

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL E INGENIERA CIVIL

TEMA:

**CORRELACIONES MÚLTIPLES ENTRE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS,
VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN (VP), CORTE (VS) Y DATOS DE
CLASIFICACIÓN SUCS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN DEL BLOQUE G DE LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO - CAMPUS SUR.**

AUTORES:

JARAMILLO LÓPEZ KEVIN DANIEL

NARANJO BORJA YADIRA DAYANARA

TUTOR

RODRÍGUEZ BADILLO FREDDY ISRAEL

Quito, junio 2021

Quito, junio 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Jaramillo López Kevin Daniel y Naranjo Borja Yadira Dayanara, con documento de identificación N° 1750376046 y 1751620467 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación con el tema: **CORRELACIONES MÚLTIPLES ENTRE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS, VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN (VP), CORTE (VS) Y DATOS DE CLASIFICACIÓN SUCS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN DEL BLOQUE G DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO - CAMPUS SUR**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIEROS CIVILES**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Jaramillo López Kevin Daniel
C.I. 1750376046

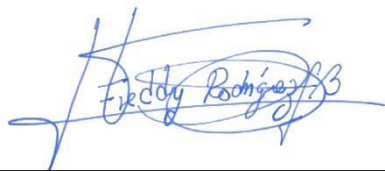


Naranjo Borja Yadira Dayanara
C.I. 1751620467

Quito, junio 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo, con el tema: **CORRELACIONES MÚLTIPLES ENTRE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS, VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN (VP), CORTE (VS) Y DATOS DE CLASIFICACIÓN SUCS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN DEL BLOQUE G DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO - CAMPUS SUR**, realizado por Jaramillo López Kevin Daniel con C.I.: 1750376046 y Naranjo Borja Yadira Dayanara con C.I.: 1751620467, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

A handwritten signature in blue ink, reading "Freddy Rodríguez", with a stylized flourish at the end. The signature is positioned above a horizontal line.

Freddy Israel Rodríguez Badillo C.I.
1720094026

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MUESTRA DE SUELO Y METODOS	3
2.1 Muestras de suelo	3
2.1.1 Ubicación	3
2.2 Descripción del suelo	4
2.3 Metodología	4
2.3.1 Ensayos Geofísicos	4
2.3.1.1 Sísmica de refracción	5
2.3.1.1 MASW/MAM	5
2.3.2 Ensayo SPT	6
2.3.3 Ensayos de clasificación de suelos	6
2.3.3.1 Clasificación de suelos SUCS	7
2.3.3.2 Ensayo de corte directo UU	7
2.3.4 Ensayo triaxial UU (No consolidado no drenado sin saturar)	7
2.3.5 Análisis de varianza (ANOVA)	7
2.3.6 Análisis de regresión lineal múltiple	8
2.3.7 Supuestos residuales de ANOVA y Regresión Lineal Múltiple	9
2.3.8 Intervalos o niveles de confianza	9
2.3.9 Diferencia de medias	9
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
3.1 Análisis estadístico en RStudio	10
3.1.1 Análisis de varianzas ANOVA	10
3.1.2 Análisis regresión lineal múltiple	11
3.1.3 Verificación de supuestos residuales	12
3.1.4 Intervalos de confianza	13
3.1.5 Análisis de diferencia de medias	13
3.1.6 Gráficas entre variable dependientes calculadas y ajustadas	13

3.1.7 Errores relativos entre las variables observadas y las variables	14
4. CONCLUSIONES	14
REFERENCIAS	15

CORRELACIONES MÚLTIPLES ENTRE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS, VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN (VP), CORTE (VS) Y DATOS DE CLASIFICACIÓN SUCS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN DEL BLOQUE G DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO - CAMPUS SUR

MULTIPLE CORRELATIONS BETWEEN GEOMECHANICAL PROPERTIES, COMPRESSION WAVE VELOCITIES (VP), SHEAR WAVE VELOCITIES (VS) AND SUCS CLASSIFICATION DATA IN THE FOUNDATION SOIL OF BLOCK G AT THE SALESIAN POLYTECHNIC UNIVERSITY – SOUTH CAMPUS

Kevin Jaramillo-López¹, Yadira Naranjo-Borja²

Resumen

La presente investigación, tiene como objetivo desarrollar correlaciones múltiples entre las propiedades geomecánicas (Cohesión c , Ángulo de Fricción ϕ , Módulo de Elasticidad E_{50}), número de golpes N_{SPT} , en función de la Clasificación SUCS y datos obtenidos en ensayos Geofísicos; los cuales ayudarán a reducir la cantidad de ensayos a ejecutarse, traduciéndose en costos y tiempos de ejecución de los estudios geotécnicos, en áreas de estudio extensas. Una vez definida la zona de estudio, se realizaron ensayos de campo como Sísmica de Refracción, MASW & MAM, para obtener las velocidades de onda de compresión y corte, posteriormente se ejecutó una perforación mediante el ensayo SPT, donde se obtuvo el número de golpes, muestras alteradas e inalteradas para el desarrollo de los ensayos de laboratorio (Clasificación

Abstract

The current research is developed using multiples correlations between geomechanical properties (Cohesion c , Friction angle ϕ , Elastic Modulus) and number of blows N_{SPT} according to the SUCS Classification and data obtained in Geophysical tests; which will help to reduce the number of tests to be performed, resulting in costs and execution times of geotechnical studies in large study areas. Once the study area was defined field tests were done such as, Seismic Refraction, MASW & MAM, to get the compression and shear wave velocities, next a drilling was made using the SPT test where the number of blows was measured, altered and unaltered samples were obtained, for the development of laboratory tests (SUCS Classification and Direct Shear) to obtain the geomechanical properties mentioned before. For the analysis of variances (ANOVA), the database was added to the

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: kjaramillol@est.ups.edu.ec; ynaranjob2@est.ups.edu.ec

SUCS y Corte Directo) para obtener las propiedades geomecánicas antes mencionadas. Para el análisis de varianzas (ANOVA), se complementó la base de datos con resultados obtenidos del estudio de suelos del Bloque G y de las estaciones cercanas de la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito para determinar las variables estadísticamente representativas que intervienen en la regresión lineal múltiple, posteriormente se sometieron a un análisis de supuestos de residuos y niveles de confianza para obtener las ecuaciones con un coeficiente de correlación adecuado.

Palabras Clave: correlaciones múltiples, propiedades geomecánicas, número de golpes, velocidades de onda de compresión y corte, ANOVA.

results obtained from the soil study at Block G and the nearby stations of the Metropolitan Public Company Metro de Quito, to determine the statistically representative variables which are involved in the multiple linear regression, which were then subjected to an analysis of residual assumptions and confidence levels to obtain the equations with an adequate correlation coefficient.

Keywords: multiple correlations, geomechanical properties, number of blows, compression and shear wave velocities, ANOVA.

1. Introducción

En investigaciones anteriores, se determinaron correlaciones empíricas (anexo 1), utilizando propiedades geomecánicas (ángulo de fricción interna ϕ , cohesión c , módulo de elasticidad E_{50}), ensayos geofísicos (velocidades de onda de compresión V_p , corte V_s) y datos de perforaciones (N_{spt}); que en su mayoría han sido realizados en Europa y Asia donde I.G. Mindel, (2002) propone correlaciones entre el ángulo de fricción, cohesión, módulo de elasticidad, número de golpes SPT y velocidades de onda primaria y secundaria para el suelo de Ucrania, y G. N. Nazarov, (1969) indica correlaciones entre algunas características físico – mecánicas y las obtenidas por refracción sísmica en los suelos de Rusia [1].x

El estudio realizado permitió obtener cinco ecuaciones distintas que servirán de alternativa de información. Puesto que en la mayoría de las investigaciones presentan correlaciones lineales simples entre dichos parámetros, que no son necesariamente aplicables a los suelos locales presentados en el anexo 1, además no incluyen ciertos factores importantes como los obtenidos mediante la clasificación unificada de suelos (SUCS) y contenido de humedad, es por esto que, se buscó obtener correlaciones para propiedades geomecánicas, número de golpes en función del ensayo SPT, ensayos de laboratorio y ensayos Geofísicos. Estas correlaciones complementan los resultados de las perforaciones y ensayos de laboratorio realizados en el sitio.

Para hacer posible la investigación se ejecutaron dos ensayos geofísicos, Sísmica de Refracción (TRS) y Multichannel analysis of surface waves & Multichannel analysis of microtremor (MASW & MAM) basados en la norma ASTM D5777 [1] y ASTM D7400 [2] respectivamente. También se realizó el ensayo Standar Penetration Test SPT (ASTM D1586) [3], donde se hizo la extracción de muestras alteradas para Clasificación SUCS (ASTM D2487) [4], que implica granulometría por lavado (ASTM C136) [5], contenido de

humedad (ASTM D2216) [6] y límites de Atterberg (ASTM D4318) [7]; y la toma de muestras inalteradas para el ensayo de Corte Directo no consolidado no drenado (ASTM D3080) [8], además se tomó en cuenta los resultados plasmados en el estudio de suelos del Bloque G.

Adicionalmente, se complementó con los datos cercanos obtenidos en la “Evaluación Geotécnica de Detalle del Metro de Quito”, en el cual presentan resultados del ensayo geofísico Down Hole (ASTM D4428 [9] y ASTM D7400 [2]), ensayos triaxiales no consolidados no drenados (UU) sin saturar (ASTM D2850) [10].

A fin de la construcción de las correlaciones lineales múltiples, se utilizó el software RStudio, el cual se dedica a la programación estadística y gráficos. Dentro de sus funciones está la herramienta de análisis de varianza o factorial (ANOVA), que permite determinar el efecto de uno o más factores sobre la media de una variable continua, esto se traduce, en encontrar que parámetros son estadísticamente representativos e intervienen directamente de las variables independientes. Estos se incluyen en la regresión lineal múltiple y quedan en función de la variable dependiente a estudiar, logrando así, determinar una correlación que cumpla con ciertos supuestos, para tener un mayor grado de confiabilidad.

2. Muestras de suelo y métodos

2.1. Muestras de suelo

2.1.1. Ubicación

En la Figura 1, se indica la localización de las perforaciones, una se realizó durante la ejecución de la investigación en la parte posterior del Bloque G y se representa con la simbología SMG, otras tres mencionadas en el estudio de suelos que realizó la UPS para la construcción del edificio nombradas con la letra P, mientras que trece más fueron realizadas por la EPMMQ en lugares cercanos al sitio y llamadas SMQ.

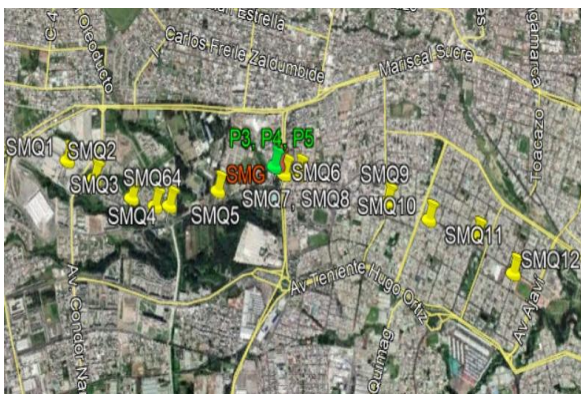


Figura 1. Ubicación de perforaciones en el sur de Quito.

En la Tabla 1 se detalla el sitio analizado de sur a norte, perforaciones, sector, ubicación y código.

Tabla 1. Perforaciones.

N°	Sector	Ubicación	Código
1	Quitumbe	Calle 4, Parada de taxis, Terminal Terrestre Quitumbe.	SMQ1
2	Las Cuadras	Calle Pumapungo, frente a conjunto "Solidaridad Quitumbe Etapa 2"	SMQ2
3	Las Cuadras	Calle S35A y Pumapungo, junto a cancha de fútbol.	SMQ3
4	Las Cuadras	Av. Rumichaca Ñan y calle J	SMQ64
5	Las Cuadras	Av. Rumichaca Ñan y Av. Amaru Ñan, Monumento conjunto "Paraíso del Sur"	SMQ4
6	Las Cuadras	Av. Rumichaca Ñan, entrada del parque "Las Cuadras"	SMQ5
7	Las Cuadras	Av. Rumichaca Ñan y Moran Valverde Universidad Politécnica Salesiana (Cancha, posterior al Bloque G)	SMG
8	Las Cuadras	Universidad Politécnica Salesiana (esquina superior izquierda del Bloque G)	P-3
9	Las Cuadras	Universidad Politécnica Salesiana (Centro del Bloque G)	P-4
10	Las Cuadras	Universidad Politécnica Salesiana (esquina inferior derecha del Bloque G)	P-5
11	Las Cuadras	Av. Rumichaca Ñan y Moran Valverde Unidad Educativa Quitumbe	SMQ-6
12	Turubamba Alto	Av. Rumichaca Ñan y Borbom	SMQ-7

13	Turubamba Alto	Av. Rumichaca Ñan y Jose Ponton Estadio del AUCAS	SMQ-8
14	Turubamba Alto	Av. Rumichaca Ñan y Cusubamba	SMQ-9
15	Solanda	Calle José María Alemán y final de calle José Lalama	SMQ-10
16	Solanda	Calle José María Alemán y José Abarcas – Parque Ecológico	SMQ-11
17	Solanda	Calle Benancio Estandoque y Marcelo Spinola – Liga Barrial Solanda	SMQ-12

2.2. Descripción del suelo

En la perforación realizada en la zona posterior del bloque G en el año 2020 detallada en el anexo 2, así como en el informe del estudio de suelos en el año 2009 muestran que los materiales predominantes son:

- De 0 a 0.3 m se presenta capa vegetal.
- El estrato de 1.50 a 3.50 m se compone de arena limosa de media plasticidad, húmedo de color café oscuro.
- A continuación, aparecen estratos de limo arenoso de baja plasticidad, donde predomina el grano fino, húmedo de 3.50 a 8 m.
- Finalmente, aparece arena limosa de grano medio y fino, con restos de oxidaciones, muy húmedos de color café claro y verdoso hasta 15 m de profundidad.

A este estudio se agregó datos de las perforaciones realizadas por EPMMQ cercanas a la Universidad Politécnica Salesiana ya que tienen el mismo tipo de suelo.

2.3. Metodología

2.3.1. Ensayos Geofísicos

Para la investigación, se utilizó datos del ensayo Down Hole proporcionados por la EPMMQ, y durante el estudio se realizó dos perfiles sísmicos: identificados en la Figura 2 como LS-1, ubicado en la cancha, en la parte posterior del bloque G.



Figura 2. Línea geofísica, LS-1= 51 m, ubicada en la parte posterior del bloque G de la UPS.

En la Tabla 2, están detalladas las líneas sísmicas, coordenadas y longitudes efectuadas.

Tabla 2. Información Líneas Sísmicas

Línea Sísmica	Puntos	Coordenadas UTM WGS-84 (m)	Longitud (m)
LS-1 SÍSMICA DE REFRACCIÓN	Inicio	N 9969270 - E 17773005	51
	Final	N 9969235 - E 17773048	
LS-1 MASW/MAM	Inicio	N 9969268 - E 17773005	51
	Final	N 9969242 - E 17773049	

2.3.1.1.) Sísmica de refracción

Para la presente investigación se generó un campo sísmico artificial mediante golpes de martillo para determinar las ondas P, utilizando geófonos de 14.0 Hz, con espaciamiento de 3.00 metros de longitud como se indica en la Figura 3.



Figura 3. Ensayo de sísmica de refracción, realizado en la parte posterior del bloque G de la UPS.

Se logró medir en superficie los tiempos de llegada de las ondas refractadas de cada uno de los diferentes estratos en profundidad. Representado gráficamente en coordenadas (x, y) se obtiene un conjunto de curvas tiempo-distancia conocidas como dromocronas

señaladas en la Figura 4, las cuales son la base gráfica que permite determinar, mediante métodos de interpretación, las velocidades y los espesores de los estratos que las caracterizan.

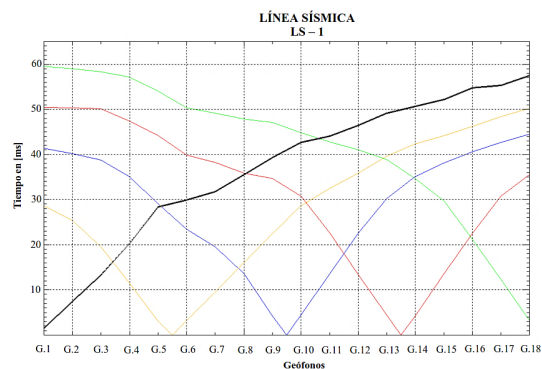


Figura 4. Dromocronas LS-1, realizado en la parte posterior del bloque G de la UPS.

A continuación, se obtuvo las velocidades de ondas P y profundidades, utilizando el Software Rayfract versión 3.36, con los cuales se determinó la conformación de los diferentes estratos del subsuelo, donde se incluyen: las profundidades mediante las fronteras litológicas y los valores de velocidades longitudinales contenidos en el anexo 3.

2.3.1.2.) MASW/MAM

El procedimiento para la toma de datos es semejante al procedimiento de la sísmica de refracción, tienen la misma metodología de espaciamiento y aplicación de energía. Con la diferencia que los geófonos utilizados en esta técnica son para frecuencias más bajas, por lo que alcanzarán mayores profundidades que los geófonos utilizados para sísmica de refracción.



Figura 5. Ensayo MASW&MAM, realizado en la parte posterior del bloque G de la UPS.

En la Figura 5 se indica el desarrollo de la técnica MASW&MAM, se empleó geófonos de 4.5 Hz a una distancia de 6 m respectivamente, para generar el campo sísmico artificial, obteniendo como resultado el tiempo que emplean las ondas superficiales en llegar a cada geófono.

Para el método pasivo MAM, efectivo en las profundidades, se monitoreó durante 30 minutos las vibraciones ambientales de la línea sísmica LS-1. La combinación de los dos procedimientos nos dio una buena estimación de las ondas de corte S a diferentes profundidades. La interpretación se realizó utilizando el Software Surface Wave Analysis Wizard y se presenta en el anexo 4.

2.3.2. Ensayo SPT

En la Figura 6 se observa la ejecución del ensayo SPT en la parte posterior del bloque G de la Universidad Politécnica Salesiana.



Figura 6. Ensayo SPT, ubicado en la parte posterior del bloque G de la Universidad Politécnica Salesiana- Campus Sur.

Consiste en la obtención de muestras alteradas e inalteradas del suelo de acuerdo a la norma ASTM D1586 [3], con la siguiente metodología:

- Se introdujo la cuchara partida debidamente normalizado en un pozo de sondeo mediante golpes con una masa de 63.5 kg.
- El número de golpes se lo contabilizó en 3 tramos de 15 cm de avance cada uno, denominándole N_{SPT} a la suma del segundo y tercer avance.

- En la Figura 7 se observa las muestras alteradas que fueron colocadas en fundas plásticas y selladas, con el fin de evitar la pérdida de humedad.



Figura 7. Muestra alterada en la cuchara partida obtenida del ensayo SPT, en la parte Posterior del bloque G de la UPS.

- Las muestras inalteradas como se indica en la Figura 8 fueron tomadas utilizando el tubo Shelby de pared delgada y en su interior se introdujo un tubo PVC para transporte de la misma, los extremos fueron envueltos con plástico film y se selló completamente, evitando la pérdida de humedad del suelo.



Figura 8. Extracción de muestra inalterada, ubicada en Universidad Politécnica Salesiana- Campus Sur, Bloque G.

Adicionalmente se midió la ubicación del nivel freático desde la superficie a 5.57 m, una vez que se estabilizó el nivel de agua.

2.3.3. Ensayos de clasificación de suelos

Para la caracterización del tipo de suelo se realizaron los ensayos mencionados en la Tabla 3:

Tabla 3. Ensayos para caracterización del tipo de suelo.

Ensayo	Norma
Granulometría por lavado	ASTM C 136
Contenido de humedad secado al horno	ASTM D 2216
Límite Líquido	ASTM D 4318
Límite Plástico	ASTM D 4318
Clasificación de suelos SUCS	ASTM D 2487

2.3.3.1.) Clasificación de suelos SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se realizó cumpliendo la norma ASTM D2487 [4].

- Una vez calculados los porcentajes de grava, arena, finos, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, se procede a clasificar el suelo, utilizando la metodología indicada en las Figuras 9-10:

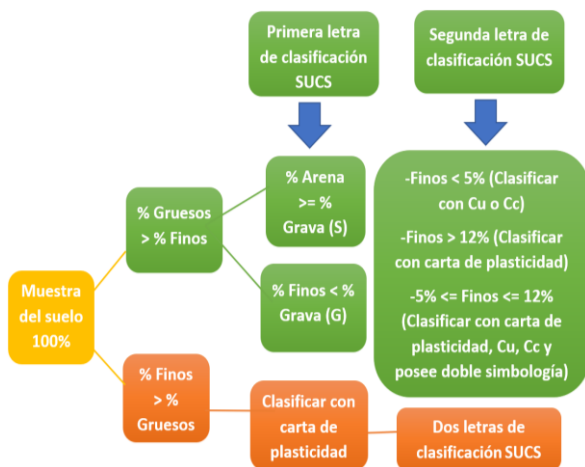


Figura 9. Procedimiento de clasificación SUCS.

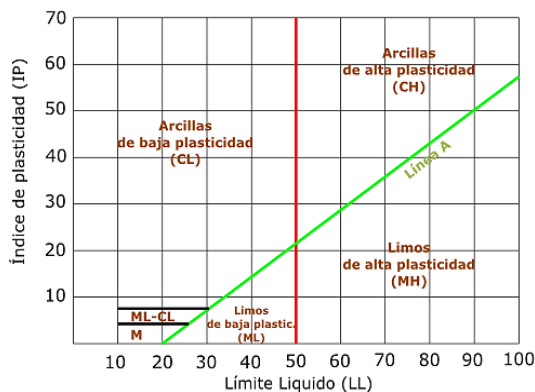


Figura 10. Carta de plasticidad (SUCS) [11].

2.3.3.2.) Ensayo de corte directo UU

Se realizó el ensayo, utilizando dos muestras no saturadas y una saturada, siguiendo la norma ASTM D 3080 [8]:

- Se talló 3 muestras del suelo en forma de cilindro de 2 cm de alto y un diámetro de 5 cm.
- Se colocó la piedra porosa y el pistón de carga sobre la superficie de la muestra.
- Se aplicó la carga vertical, siendo estos valores típicos de esfuerzo normal (0.5 – 1 y 2 kg/ cm²), y una velocidad de corte horizontal baja de tal manera que la presión de poros sea cero durante el corte.
- Como resultado final se obtuvo los pares ordenados (σ_n, τ) para desarrollar la gráfica de falla ($\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$), permitiendo calcular los parámetros geomecánicos (cohesión y ángulo de fricción interna del suelo en condiciones drenadas).

En la Figura 11 se observa el equipo utilizado para realizar el ensayo de corte directo.



Figura 11. Equipo para ensayo de corte directo.

2.3.4. Ensayo triaxial UU (No consolidado no drenado sin saturar)

Basado en la norma ASTM D 2850 [10], se tomó datos obtenidos por la EPMMQ, donde se detalla las propiedades geomecánicas (ángulo de fricción, cohesión), el módulo de elasticidad secante (al 50%) del esfuerzo de rotura que depende del grado de confinamiento detallados en el anexo 5.

2.3.5. Análisis de varianza (ANOVA)

La técnica de análisis de varianza ANOVA también conocida como análisis factorial constituye una herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores sobre

la media de una variable continua, indicando cual variable independiente es estadísticamente representativa [12].

La metodología ANOVA multifactorial plantea la hipótesis [13]:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \dots + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

Donde α_i es el efecto del factor F_1 en nivel i , β_j es el efecto del factor F_2 en nivel j , y ϵ_{ijk} es el residuo debido al azar, y μ es la media global de la variable observada o dependiente.

- Hipótesis nula: los factores α_i, β_j, \dots son iguales a cero, entonces los factores F_1, F_2, \dots no son significativos;
- Hipótesis alternativa: los factores α_i, β_j, \dots son diferentes de cero, por lo tanto, los factores F_1, F_2, \dots son significativos.

Los resultados más importantes del análisis estadístico ANOVA son:

- Valor F: es una estadística de prueba, que relaciona los cuadrados medios y los cuadrados medios residuales.

$$F = \frac{CM}{CME} \quad (2)$$

Dónde:

CM: cuadrados medios [14]

CME: cuadrados medios residuales [14].

Utilizada para determinar si las variables independientes están coligadas a las variables dependientes ($\phi, c, E_{50}, N_{SPT}, V_s$). Si este coeficiente es mayor al dado por la tabla de valores críticos de la distribución F con área a la derecha de 0.05, se rechaza la hipótesis nula, indicando que esas variables independientes son significativas [14].

- p-valúe ($\Pr(>F)$): representa el área sombreada de la probabilidad de observar un estadístico F que sea al menos tan alto como el valor F que se obtuvo en el estudio. Si dicho valor es menor o igual al 5%, las variables independientes son estadísticamente representativas para el

modelo ejecutado, por lo tanto, se rechazará la hipótesis nula [14].

2.3.6. Análisis de regresión lineal múltiple

Es un análisis que permite determinar cada uno de los coeficientes que formarán parte de una ecuación lineal, en la cual las variables dependientes serán cinco (ángulo de fricción, cohesión, módulo de elasticidad, número de golpes, velocidad de corte) y las variables independientes serán los resultados obtenidos en la clasificación SUCS, número de golpes del ensayo SPT y ensayos geofísicos.

Los resultados del análisis estadístico de regresión lineal son [15]:

- El intercepto, es matemáticamente el punto donde la ecuación cruza al eje de las Y (variable dependiente), siendo cero las demás variables independientes.
- Los coeficientes que indican los valores de las variables independientes junto a su error estándar, definen si la variable dependiente incrementa o disminuye.
- El error estándar es un error promedio que mide la eficiencia de la ecuación de la regresión lineal múltiple, es decir mientras más cerca esté de cero la estimación del coeficiente será mejor predicha.
- El valor estadístico p-valúe es utilizado para determinar cuan importantes son los efectos de las variables independientes sobre cada una de las variables dependientes ajustadas, siendo más significativos los valores menores o iguales a 0.05.
- El coeficiente de determinación ajustada también conocido como R^2 ajustado, es un indicador de bondad de ajuste del modelo, no tiene en cuenta el impacto de todas las variables independientes, sino solo aquellas que impactan la variación de la variable dependiente. Los valores cercanos a 1 indican un buen ajuste con cada una de las variables dependientes [16].

La presente investigación se desarrolló con un modelo de regresión lineal múltiple, donde las variables se pueden relacionar mediante una

ecuación lineal, expresada de la siguiente manera [15]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (3)$$

Dónde:

- y : variable dependiente (ángulo de fricción, cohesión, módulo de elasticidad, número de golpes, velocidad de corte)
- β_i : parámetros a estimar (coeficientes de ajuste de la ecuación de correlación)
- X_i : variables estadísticamente representativas.
- ε : error de observación

2.3.7. Supuestos residuales de ANOVA y Regresión Lineal Múltiple

Los supuestos residuales son aquellos que permiten determinar el comportamiento de las variables dependientes a partir del grupo de variables independientes de forma analítica y gráfica, esto se emplea para verificar que los resultados del ANOVA y de la regresión lineal múltiple tengan validez.

Cada uno de los análisis ANOVA y regresión lineal múltiple deben cumplir con la hipótesis nula de cada uno de los supuestos residuales señalados en la Tabla 4, verificando el supuesto residual mediante el p-valúe mayor a 0.05.

Tabla 4. Supuestos estadísticos residuales para análisis ANOVA y regresión lineal múltiple.

Supuesto residual	ANOVA	RLM	Hipótesis Nula	Hipótesis Alternativa
Independencia	Durbin-Watson	Multicolinealidad y prueba de	Existe independencia de residuos.	No existe independencia de residuos.
Normalidad	Shapiro-Wilk	Jarque-Bera	Los residuos se distribuyen normalmente con media cero y varianza constante.	Los residuos no se distribuyen normalmente con media cero y varianza constante.

Supuesto residual	ANOVA	RLM	Hipótesis Nula	Hipótesis Alternativa
Homocedasticidad	Breusch-Pagan Test	Puntuación de varianza neoconstante	Los residuos presentan varianzas similares, es decir homogeneidad de varianzas.	Los residuos no presentan homogeneidad de varianzas.

Los residuos se definen como la diferencia entre los valores de las variables dependientes (ϕ , c , E_{50} , N_{SPT} , V_s) y el valor que pronostica el modelo de regresión lineal múltiple (ϕ_{ajust} , coh_{ajust} , E_{ajust} , N_{ajust} , V_{sajust}) [15].

2.3.8. Intervalos o niveles de confianza

Los niveles de confianza, permiten estimar entre que rangos de valores, las variables independientes se deben usar en la regresión lineal múltiple, esto dentro de una determinada probabilidad (generalmente 95%) [17].

$$Intervalos\ de\ confianza = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Donde:

- \bar{x} : Media de las variables independientes.
- Z : variable que proviene de una distribución normal, se determina mediante $1 - \alpha$, donde α es el nivel de significancia deseado por lo que para la investigación se optó por: $1 - \alpha = 0,05$.
- σ : varianza de las variables independientes.
- n : número de muestras.

2.3.9. Diferencia de medias

La diferencia de medias, es utilizada cuando se requiere determinar el nivel de similitud o diferencia entre los valores de la media de una variable dependiente de 2 poblaciones bajo estudio, esto significa que, las medias de cada una de las variables dependientes del sector de muestras de suelos alrededor del Bloque G, es

igual a las medias de las variables dependientes ajustadas.

Para comprobar si es aceptable la hipótesis nula, se debe verificar previamente con la prueba t de Student [18].

3. Resultados y Discusión

A partir de los datos obtenidos en los ensayos directos e indirectos, presentados en el anexo 5, se desarrolló el modelo ANOVA y la regresión lineal múltiple en el software RStudio, con sus respectivas discusiones.

3.1. Análisis estadístico en RStudio

3.1.1. Análisis de varianzas ANOVA

Una forma de identificar las variables estadísticamente significativas, es analizando los valores F y $Pr(>F)$, ya que poseen una relación inversamente proporcional. A continuación, se detalla un ejemplo para el ángulo de fricción, este mismo análisis se lo realiza para las demás variables dependientes indicadas en el anexo 6.

Tabla 5. Resumen estadístico de modelo ANOVA para Ángulo de Fricción.

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	$Pr(>F)$
% Humedad	1	79.7	79.7	15.60	0.05
Límite Líquido	1	357.5	357.5	70.02	0.01
Límite Plástico	1	2.0	2.0	0.39	0.59
% Grava	1	281.9	281.9	55.21	0.01
% Arena	1	4.0	4.0	0.79	0.46
Velocidad de onda de compresión	1	194.7	194.7	38.12	0.02
Velocidad de onda de corte	1	11.8	11.8	2.30	0.26

En la Tabla 5 donde la variable dependiente es el ángulo de fricción, las variables independientes % Humedad (15.60; 0.05), LL (70.02; 0.01), % Grava (55.21; 0.01) y V_p (38.12; 0.02) respectivamente, son estadísticamente representativas.

Tabla 6. Resumen estadístico de modelo ANOVA para Cohesión.

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	$Pr(>F)$
% Humedad	1	2.0886	2.0886	336.086	0.0347
Límite Líquido	1	1.2157	1.2157	195.629	0.0454
Límite Plástico	1	0.1065	0.1065	17.135	0.1509
% Grava	1	0.0302	0.0302	4.866	0.2710
% Arena	1	0.5907	0.5907	95.060	0.0651
% Finos	1	0.0070	0.0070	1.130	0.4805
Velocidad de onda de compresión	1	0.0039	0.0039	0.629	0.5732
Velocidad de onda de corte	1	0.4891	0.4891	78.710	0.0715

Los valores F en la Tabla 6, correspondientes a las variables independientes % W (336.08), LL (195.62), % Arena (95.06) y V_s (78.71) son altos, por lo que son consideradas estadísticamente representativas para la variable dependiente cohesión.

Nota: El p-valué recomendado son valores menores o iguales a 0.05, pero el programa RStudio, señala también a las variables independientes (%arena y V_s) como estadísticamente representativas cuyos valores son cercanos a 0.05, ajustando mejor la correlación, pero en caso de no tener datos, se los puede obviar.

En la Tabla 7 se resumen las variables estadísticamente representativas para cada modelo ANOVA.

Tabla 7. Resumen general de variables estadísticamente representativas de modelo ANOVA.

V. I \ V. D	Ángulo de fricción	Cohesión	Módulo de elasticidad	Número de Golpes	Velocidad de ondas de corte
Esfuerzo de confinamiento			X		
Número de Golpes					X
Contenido de Humedad	X	X	X		X
Límite Líquido	X	X			
Límite Plástico				X	
Índice de plasticidad					X

Porcentaje Grava	X	X	X	X
Porcentaje Arena		X	X	
Velocidad de onda de compresión	X	X	X	
Velocidad de onda de corte		X	X	

3.1.2. Análisis regresión lineal múltiple

En el análisis realizado para cada modelo, se determinó que el valor del coeficiente positivo hace que la variable dependiente aumente y viceversa, un $Pr > (t)$ menor a 0.05 indica el coeficiente más representativo, mientras que un error estándar bajo señala el coeficiente mejor calculado. El R^2_{ajust} indica en que porcentaje las variables independientes, pueden estimarse con la correlación. Los resultados obtenidos para cada variable dependiente se detallan en el anexo 7.

Tabla 8. Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con variable Número de Golpes.

Coefficiente	Valor Coeficiente	Error estándar	Valor estándar	$Pr(> t)$
Intercepto	-22.675251	4.358647	-5.202	6.00e-05
Límite Plástico	0.110802	0.066850	1.657	0.11475
% Arena	0.167506	0.053752	3.116	0.00596
% Grava	0.078028	0.095072	0.821	0.42254
Velocidad de onda de compresión	0.021781	0.003374	6.455	4.50e-06
Velocidad de onda de corte	0.083247	0.016099	5.171	6.42e-05
Error residual estándar	R^2_{ajust}	P-valué	Índice de fijación	
3.386 en 18 grados de libertad	0.95	5.709e-12	87.1 en 5 y 18 grados de libertad	

Para el ejemplo en la Tabla 8 para la variable número de golpes, se analizó el coeficiente de la variable independiente V_p , siendo el mejor estimado y significativo, ya que posee un error estándar de 0.003374% y un Pr de 4.50e-06. La ecuación se construye con R^2_{ajust} que indica el 95% las variables independientes pudieron estimarse con esta correlación. En este caso todos los coeficientes son positivos lo que

ocasionara que la variable dependiente aumente.

En la Tabla 9 se indican los resultados de los coeficientes de determinación ajustados (R^2_{ajust}) clasificados en excelente ($0.9 \leq R^2_{ajust} < 1$), bueno ($0.8 \leq R^2_{ajust} < 0.9$), regular ($0.5 \leq R^2_{ajust} < 0.8$) y malo (< 0.5) se indican a continuación [19]:

Tabla 9. Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajust}) para las variables dependientes.

Variables Dependientes	R^2_{ajust}
Angulo de fricción	0.88
Cohesión	0.79
Módulo de elasticidad	0.68
Número de Golpes	0.95
Velocidad de onda de corte	0.93

La construcción de las correlaciones lineales múltiples para las variables dependientes ajustadas son las indicadas en la Tabla 10:

Tabla 10. Correlaciones obtenidas entre variables independientes y dependientes.

Angulo de fricción
$\varphi(^{\circ}) = -51.763 - 0.323 * \%Humedad + 1.895 * \%LL - 0.342 * \%Grava + 0.031 * V_p(\frac{m}{s})$
Cohesión
$c(\frac{Kg}{cm^2}) = -9.969 + 0.103 * \%Humedad + 0.175 * \%LL + 0.058 * \%Arena - 0.0006 * V_s(\frac{m}{s})$
Módulo de Elasticidad
$E_{50}(\frac{Kg}{cm^2}) = 294.293 + 65.672 * \sigma_c(\frac{Kg}{cm^2}) - 6.223 * \%Humedad + 14.915 * \%Grava - 0.358 * V_p(\frac{m}{s})$
Número de Golpes
$N_{spt} = -22.675 + 0.110 * \%LP + 0.078 * \%Grava + 0.167 * \%Arena + 0.021 * V_p(\frac{m}{s}) + 0.083 * V_s(\frac{m}{s})$

Velocidad de Onda de Corte

$$V_s(\frac{m}{s}) = 244.898 + 2.160 * N_{spt} - 0.010 * \%Humedad - 3.434 * \%IP + 1.473 * \%Grava$$

Nota: Los coeficientes de las diferentes correlaciones se detallan en el anexo 7, y se recomienda utilizar todos los decimales para obtener más precisión en los resultados.

Donde:

- ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo (Grados)
- C: Cohesión (kg/cm²)
- E_{50} : Módulo de elasticidad del suelo al 50% de rotura (kg/cm²)
- σ_c : Esfuerzo de confinamiento (kg/cm²)
- N_{spt} : Número de golpes Spt
- % Humedad: Contenido de humedad del suelo (%)
- LL: Límite líquido (%)
- LP: Límite plástico (%)
- IP: Índice de plasticidad (%)
- Grava: Porcentaje de Grava (%)
- Arena: Porcentaje de Arena (%)
- V_p : Velocidad de onda de compresión (m/s)
- V_s : Velocidad de onda de corte (m/s)

3.1.3. Verificación de supuestos residuales

En este análisis se verifica que todos los supuestos residuales cumplan con la hipótesis que señala que el p-value debe ser mayor a 0.05, y un VIF (factor de inflación de la varianza) menor a 10. Los resultados para ángulo de fricción, módulo de elasticidad y velocidad de onda de corte se indican en el anexo 8. Además, los resultados de los supuestos residuales, aplicando el método gráfico, se presentan en el apartado anexo 9.

Tabla 11. Supuestos, prueba y nivel de significancia, modelo de regresión lineal múltiple para variable Cohesión.

	Supuestos Residuales	Prueba	p-valué (>0.05)
ANOVA	Independencia	Durbin-Watson	0.044
	Normalidad	Shapiro-Wilk	0.46
	Homocedasticidad	Breush-Pagan Test	0.27
RLM		Prueba de rachas	0.17
	Independencia	Colinealidad	VIF < 10
	Normalidad	Jarque-Bera	0.63
	Homocedasticidad	Puntuación de varianza neoconstante	0.92

En el análisis ANOVA y regresión lineal múltiple para el ejemplo cohesión observado en la Tabla 11, todos los supuestos residuales cumplen, a excepción de la prueba Durbin Watson en ANOVA, que da un p-valué de 0.044, por lo que no cumple el supuesto de Independencia, pero por ser un análisis preliminar, no afecta a la conformación de la regresión lineal múltiple ya que en este si cumple el supuesto de independencia de la prueba de rachas, además se lo realizó mediante un ensayo prueba-error para ver que variable independiente es la más significativa.

Tabla 12. Supuestos, prueba y nivel de significancia, modelo de regresión lineal múltiple para variable número de golpes.

	Supuestos Residuales	Prueba	p-valué (>0.05)
ANOVA	Independencia	Durbin-Watson	0.65
	Normalidad	Shapiro-Wilk	0.76
	Homocedasticidad	Breush-Pagan Test	0.14
RLM		Prueba de rachas	0.40
	Independencia	Colinealidad	VIF < 10
	Normalidad	Jarque-Bera	0.97
	Homocedasticidad	Puntuación de varianza neoconstante	0.10

Nota: La prueba de colinealidad en el supuesto de independencia, inicialmente no cumplía para la variable Número de golpes, debido a que se tenía un factor de inflación de la varianza (VIF) en las dos variables independientes límite líquido y límite plástico de 28.37 y 26.05 respectivamente, por lo que se realizó la corrección eliminando la variable

independiente Límite Líquido, ya que se obtuvo un R^2 ajustado menor.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis ANOVA y en regresión lineal múltiple de acuerdo a la Tabla 12, se concluye que cumple los tres supuestos residuales de independencia, normalidad y homocedasticidad.

3.1.4. Intervalos de confianza

En este análisis se verificó que el cero no se encuentre dentro de los límites de confianza señalando que las variables independientes son estadística mente representativas hacia las variables dependientes, a su vez al contar con valores con signo positivo señala una relación positiva de las variables independientes sobre las dependientes y finalmente se verificó que los datos utilizados estén dentro de los límites de confianza establecidos. Los resultados se indican en el anexo 10.

Tabla 13. Niveles de confianza de variables de la ecuación de correlación con variable Módulo de Elasticidad.

	Lím. Inferior	Lím. Superior
Esf. de confinamiento	1.02	2.34
% Humedad	23.27	37.28
% Grava	4.46	12.78
Velocidad de onda de compresión	455.99	587.79

En el ejemplo indicado en la Tabla 13 para módulo de elasticidad tres de las 8 estaciones usadas (SMQ7; SMQ11; SMQ12) tienen más de la mitad de las variables independientes fuera de los límites establecidos en el análisis, pero sirven para poder estimar el modelo de regresión, si se aplican valores dentro de los rangos establecidos.

3.1.5. Análisis de diferencia de medias

Se determinó el cumplimiento de la hipótesis nula que indica que la media del universo de la variable dependiente es igual a la media del universo de la variable correlacionada. Observando que cumpla la hipótesis nula donde

p-valoré debe ser mayor a 0.05. Los resultados obtenidos se indican en el anexo 11.

Tabla 14. Resumen de prueba T-Student Cohesión.

$t = -3.2466$	Grados de libertad=18	p-value = 0.0045
Diferencia Medias	coh	coh correlacionada
Nivel de confianza de 95%	-0.6472983	0.6472983
Media de muestras	0.7045	0.7045

En la Tabla 14 tomando como referencia el p-value de 0.0045 para el modelo cohesión, donde señala que la resta de las medias es diferente de cero, ya que la media del universo de cohesión no es igual a la media de la población cohesión correlacionada, rechazándose la hipótesis nula.

3.1.6. Gráficas entre variable dependientes calculadas y ajustadas

Los gráficos entre las variables dependientes e independientes indican una correlación positiva al tener una línea de tendencia cercana a los 45° en todos los modelos. Los resultados se indican en el anexo 12.

Se toma como ejemplo la Figura 12, donde expone la variable módulo de elasticidad vs su ajustada se observa que los puntos siguen una línea de tendencia, con un pendiente cercano a los 45° , lo que implica que los resultados podrían ser bien estimados.

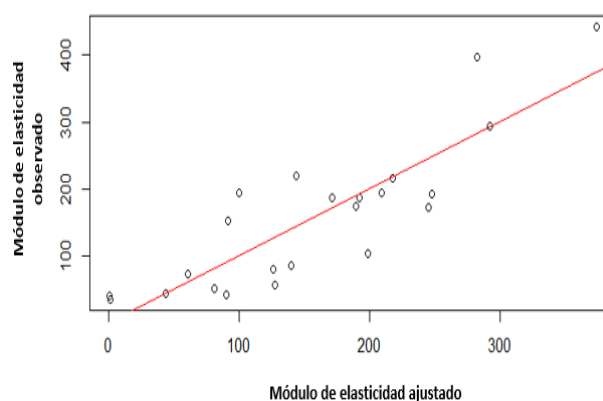


Figura 12. Gráfica Módulo de elasticidad calculado vs módulo de elasticidad ajustado.

Otro método para determinar si existe o no valores atípico dentro del modelo es mediante el diagrama de cajas y bigotes como se indica en el anexo 13, donde se observa la existencia de estos valores para los modelos cohesión (SMQ1 - 2.41) y módulo de elasticidad (SMQ6-442.09 y SMQ12 -397.64), datos que podrían influir directamente en el coeficiente de determinación ajustado, dando otro sentido a la correlación y señalando que la distribución no es normal o asimétrica, por lo que se recomienda corregirlos o eliminarlos. Pero al contar con una muestra pequeña en estos dos modelos no se los descartó.

3.1.7. Errores relativos entre las variables observadas y las variables correlacionadas

Este margen de error permite determinar la precisión entre las variables observadas y las variables correlacionadas, resultados que se presentan en el anexo 14.

Tabla 15. Resultados de la velocidad de onda de corte calculada y la velocidad de onda de corte ajustada con su error estándar.

Código	Velocidad de onda de corte (m/s)	Velocidad de onda de Corte correlacionado (m/s)	Error %
SMG12	348.00	373.98	7.46
SMG16	391.80	383.68	2.07
SMG18	391.80	375.13	4.25
SMQ8.3	352.95	345.31	2.17
SMQ2.5	354.28	383.37	8.21
SMQ2.6	432.68	1401.65	7.17
SMQ9.2	269.32	281.77	4.62
SMQ9.3	331.85	335.04	0.96
SMQ9.5	410.43	391.85	4.53
SMQ12.1	229.30	219.76	4.16
SMQ2.1	254.20	263.16	3.53
SMQ3.4	321.56	338.92	5.40
SMQ4.2	271.70	260.86	3.98
P3.1	224.00	332.65	2.99
P3.3	224.00	242.79	8.39
P4.1	224.00	212.47	5.15
P4.2	224.00	230.73	3.00
P4.10	323	210.60	5.98
P5.4	224.00	219.15	2.17

Acorde a la Tabla 15, se muestra los rangos sugeridos para los datos de velocidad de onda

de corte, se observa que dos de las cuatro variables están fuera del mismo, generando así un error de 8.39% para la estación P3.3.

De acuerdo a los datos obtenidos en el resumen estadístico presentado en el anexo 15 obtenemos los siguientes porcentajes medios de errores relativos:

- Ángulo de fricción: 10.18%
- Cohesión: 37.97%
- Módulo de Elasticidad: 43.42%
- Número de Golpes: 7.03%
- Velocidad de onda de corte: 4.25%

4. Conclusiones

- La conformación de las regresiones lineales múltiples elaboradas en el software RStudio representadas en Figura 20, indican coeficientes de determinación ajustados R^2_{ajust} mayores al 90%, la variable dependiente ángulo de fricción alcanza un 88% lo que se considera un ajuste bueno, mientras que las variables cohesión y módulo de elasticidad obtienen un R^2_{ajust} de 79% y 68% respectivamente, estableciéndolas fuera del rango aceptable.
- Al someter las variables independientes a una verificación de supuestos para el modelo ANOVA y regresión lineal múltiple, las variables ángulo de fricción, número de golpes y velocidad de onda de corte, cumplen con todas las pruebas estadísticas realizadas, concluyendo así que, las ecuaciones obtenidas son matemáticamente aplicables siempre y cuando los errores no sean muy altos. Se omite la variable cohesión, ya que no cumple el supuesto de independencia para el modelo ANOVA, pero no resulta influyente a la hora de desarrollar su correlación.
- En el modelo de velocidad de onda de corte, el coeficiente perteneciente al N_{SPT} es de 2.16 y posee un valor de significancia de $3.22e-06$ indicando que es la más influyente de todas.

- Los intervalos de confianza de las correlaciones indicados en el anexo 10, al ser diseñados con un 95% de nivel de confianza, se presume que pueden ser aplicables en sitios cercanos al bloque G de la Universidad Politécnica Salesiana y también en otras zonas de la ciudad de Quito, siempre que los valores de las variables independientes se encuentren dentro de los intervalos de confianza recomendados.
- Mediante el análisis de diferencia de medias se sabe con certeza del 95 % que las medias de las variables dependientes ajustadas poblacionales y las correlacionadas son iguales, por lo tanto, se concluye que la regresión lineal múltiple se puede destinar a poblaciones con el mismo tipo de suelo en el sur de Quito, excepto para la variable dependiente cohesión ya que esta se puede utilizar únicamente en la franja longitudinal estudiada, desde el terminal terrestre Quitumbe hasta el estadio del Aucas.
- De acuerdo a los errores arrojados para las variables dependientes ángulo de fricción en la estación SMQ5 (30.71%) y cohesión en la estación SMQ3 (102.71%), los datos de las variables independientes se encuentran dentro de los límites de confianza, por lo que se presume que el error se genera por la escasa muestra poblacional disponible en esta investigación.
- Al analizar el promedio de errores de las variables dependientes, se considera de alta aplicabilidad a las correlaciones obtenidas de los modelos N_{SPT} y V_s ya que poseen valores de errores medios menores al 7%, cumplen el análisis de diferencia de medias, supuestos residuales y tienen un coeficiente de determinación ajustado de 95 y 93% respectivamente.
- Se sugiere no utilizar las correlaciones desarrolladas para ángulo de fricción y cohesión, en suelos saturados bajo el nivel freático y con límites de Atterberg diferentes a cero, ya que al probar con

valores diferentes a estas condiciones los resultados no se ajustaron a la línea de tendencia, es decir los errores fueron altos.

Referencias

- [1] ASTM D5777, Guía estándar para el uso del método de refracción sísmica para la investigación del subsuelo, 2018, www.astm.org.
- [2] ASTM D7400, Métodos De Prueba Estándar Para Pruebas Sísmicas De Fondo De Pozo, 2014, www.astm.org.
- [3] ASTM D1586, Método de prueba estándar para la prueba de penetración estándar (SPT), 2011, www.astm.org.
- [4] ASTM D2487-17e1, Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema unificado de clasificación de suelos), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [5] ASTM C136, Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos, 2019, www.astm.org.
- [6] ASTM D2216, Métodos de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo y la roca por masa, 2019, www.astm.org.
- [7] ASTM D4318, Métodos de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos, 2017, www.astm.org.
- [8] ASTM D3080 / D3080M-11, Método de prueba estándar para la prueba de cizallamiento directo de suelos en condiciones de drenaje consolidado (retirado en 2020), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- [9] ASTM D4428, Métodos De Prueba Estándar Para Pruebas Sísmicas De

- Pozos Cruzados, 2014, www.astm.org.
- [10] ASTM D2850, Método de prueba estándar para prueba de compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
- [11] O. Cuchillo, “Apuntes del Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)”, 2015. Disponible en: <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>.
- [12] J. Amant,” ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias”, 2016. Disponible en: https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148.
- [13] J. Alcazar, “ANOVA multifactorial”. Disponible en: http://www3.uah.es/juange_alcazar/Estadistica%20Alcala/ANOVA%20multifactorial.pdf.
- [14] H. Gutierrez & R. de la Vara, “Análisis y diseño de experimentos”, segunda edición, México, 2008, pp. 60-91.
- [15] A. M. Lara Porras, “Regresión y Correlación” [online]. España: Universidad de Granada, 2017. Disponible en: <http://wpd.ugr.es/~bioestad/guia-r-studio/practica-3/>
- [16] H. Calzada, “¿Qué es el R cuadrado ajustado?”, Mexico, 2019. Disponible: <https://www.rankia.mx/blog/como-comenzar-invertir-bolsa/4439147-que-r-cuadrado-ajustado>
- [17] Candia R. y Caiozzi G., “Intervalos de confianza” [online]. Chile, 2005. Disponible: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872005000900017
- [18] Rodó, P., “Distribución t Student” [online]. España, 2017. Disponible: <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-t-de-student.html>
- [19] Martínez R., Pérez A., Tuya L. y Cánovas A. El Coeficiente de Correlación de los Rangos de Spearman. Caracterización, Rev Haban cienc méd v.8 n.2, 2009. Disponible : http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017

ANEXOS

Anexo 1: Correlaciones empíricas desarrolladas en Mathcad.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	
DATOS ESTACIÓN SMQ-3	
• VELOCIDAD DE ONDA SECUNDARIA:	$V_s := 268.2 \quad \text{m/s}$
• VELOCIDAD DE ONDA PRIMARIA:	$V_p := 562.8 \quad \text{m/s}$
• NÚMERO DE GOLPES:	$N := 18$
COHESION:	
CORRELACION N°1 (I.G. MINDEL)	CORRELACION N°2 (I.G. MINDEL)
Para limos de loes del sur de Ucrania	Para suelos saprolíticos de los Urales de Ucrania
$c' := 24 \cdot 10^{-4} \cdot V_p - 0.63$	$C := 0.908 - 0.168 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)$
$c' = 0.721 \quad \text{kg/cm}^2$	$C = 0.555 \quad \text{kg/cm}^2$
ANGULO DE FRICCION:	
CORRELACION (I.G. MINDEL)	+
Para suelos saprolíticos de los Urales de Ucrania	
$\varphi := 46.4 - 9.65 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)$	
$\varphi = 26.15 \quad ^\circ$	
MODULO DE ELASTICIDAD:	
CORRELACION N°1 (I.G. MINDEL)	
Para suelos arenosos con humedad natural para el sur de Ucrania	
$E := 1.5175 \cdot V_s - 189$	
$E = 217.994 \quad \text{kg/cm}^2$	
CORRELACION N°2 (Pérez Santisteban, Muñoz Martín A., Carbó Gorosabe A., Ruiz Fonticiella J.M.)	
Para suelos de Madrid	
$E := 1.8 \cdot 10^{-3} \cdot V_s^{2.17}$	
$E = 334.987 \quad \text{kg/cm}^2$	

NUMERO DE GOLPES:

CORRELACION (I.G. MINDEL)

Para limos de loes del sur de Ucrania

$$NSPT := 0.0284 \cdot V_p - 7.6 \quad NSPT = 8.384$$

VELOCIDAD DE ONDAS SECUNDARIAS:

- CORRELACION N°1 (T. Imai y Yoshimura)

Para todos los suelos

$$Vs1 := 76 \cdot N^{0.33} \quad Vs1 = 197.267 \quad \text{m/s}$$

- CORRELACION N°2 (Ohta y Goto)

Para todos los suelos

$$Vs2 := 85.34 \cdot N^{0.340} \quad Vs2 = 228.005 \quad \text{m/s}$$

- CORRELACION N°3 (Japan Road Association)

Para arenas

$$Vs3 := 80 \cdot N^{0.33} \quad Vs3 = 209.659 \quad \text{m/s}$$

SUELOS ALUVIALES DE SANGOLQUI: (PAZMIÑO AGULEMA LUIS ENRIQUE)

$$c' := 0.0508 - 0.0167 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)$$

$$c' = 0.016 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\varphi := 0.779 \left(\frac{V_p}{V_s} \right) + 26.529$$

$$\varphi = 28.164 \quad ^\circ$$

$$NSPT := 0.037 (V_p) + 0.1191 \quad NSPT = 20.943$$


$$Vs := 202.79 (N^{0.1956}) \quad Vs3 = 209.659 \quad \text{m/s}$$

Correlaciones empíricas calculadas para otros países y Pichincha.

Anexo 2: Log de perforación

<div><div><div><div><div></div><div>GEOSOL</div></div><div><div></div><div>DE L&E</div></div></div><div>LOG DE PERFORACIÓN</div></div></div>													
TOPOGRAFIA - GEOLOGÍA - GEOTÉCNIA - GEOFÍSICA													
PROYECTO : PROYECTO DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA						FECHA : 08/ENERO/2021							
UBICACIÓN : UPS CAMPUS SUR, CANCHA BLOQUE G (AV. MORAN VALVERDE Y AV. RUMICHACA ÑAN)						SOLICITADO : KEVIN JARAMILLO Y YADIRA NARANJO							
NIVEL FREÁTICO : 5.57 m						REALIZADO : GEOSOL - K.J y Y.N							
PROFUNDIDAD : POZO 1 DE 0.00 - 15.00 m.						INFORME : Inf.: 01 TESIS UPS							
PROF (m)	TIPO PERF	"N" SPT	PERFIL	SUCS	DESCRIPCIÓN	PROFUNDIDAD (m) VS "N" SPT	GRANULOMETRÍA			LÍMITES			W (%)
							G %	S %	F %	LL %	IP %	LP %	
0 - 0.50													
0.5-1.00	SPT	10		OL	ARCILLA LIMOSA CON ARENA, ORGÁNICA, DE GRANO MEDIO Y FINO, DE COLOR NEGRO, DE MEDIA PLASTICIDAD, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		0	39	61	36,49	12,91	23,59	25,67
1.00-1.50													
1.50-2.00	Sh												29,86
2.00-2.50	SPT	19		SM	ARENA LIMOSA, DE MEDIA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ OSCURO, HUMEDAD ACTUAL MENOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (POCO HÚMEDO)		0	53	47	29,16	6,68	22,49	24,04
2.50-2.58	SPT	40		ML	LIMO ARENOSO, DE MEDIA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ OSCURO, HUMEDAD ACTUAL MENOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (POCO HÚMEDO)		3	33	64	45,33	14,51	30,82	30,24
2.58-3.00				CL	ARCILLA LIMOSA LIGERAMENTE ARCILLOSA, DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ CLARO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (MUY HÚMEDO)		2	46	52	29,75	7,86	21,89	23,31
3.00-3.50													
3.50-3.60					ARENA LIMOSA, TONALIDAD CAFÉ AMARILLENTO A, PREDOMINA GRANO FINO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		0,75	82	18	N.P	N.P	N.P	23,31
3.60-3.70	SPT	23		SM	TONALIDAD BLANQUECINA, PREDOMINA GRANO MEDIO Y FINO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		4,61	83	13	N.P	N.P	N.P	24,14
3.70-4.00							0	41	59	29,80	6,78	23,01	23,46
4.00-4.50					LIMO ARENOSO, DE BAJA PLASTICIDAD, PREDOMINA EL GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)								
4.50-5.00	Sh			ML									26,65
5.00-5.50	SPT	21			LIMO ARENOSO DE BAJA PLASTICIDAD, PREDOMINA GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		0	37	63	32,09	8,40	23,69	24,65
5.50-5.82					ARENA ARCILLOSA, MEZCLA DE ARENA, ARCILLA Y LIMO, DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ CLARO CON PRESENCIA DE PÓMEZ, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		6	50	44	29,59	8,75	20,84	25,91
5.82-6.00				CL	ARCILLA LIMOSA CON ARENA, DE MEDIA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ CLARO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		0	38	62	32,96	10,25	22,71	23,91
6.00-6.50													
6.50-7.00	SPT	20		ML	LIMO ARENOSO, DE BAJA PLASTICIDAD, PREDOMINA EL GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (MUY HÚMEDO)		0	33	67	28,71	5,69	23,02	29,66
7.00-7.50													
7.50-8.00	Sh												25,69
8.00-8.29	SPT	45			ARENA LIMOSA, COLOR CAFÉ CLARO CON RESTOS DE OXIDACIÓN, DE LIGERA PLASTICIDAD, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (SATURADO)		0	60	40	27,40	2,95	24,45	29,33
8.29-8.50							1	57	42	28,21	3,08	25,13	30,88
8.50-9.00	SPT	66					0	66	34	25,73	3,13	22,60	28,56
9.00-9.50													
9.50-10.00	SPT	50			ARENA LIMOSA, COLOR CAFÉ CLARO CON RESTOS DE OXIDACIÓN, DE LIGERA PLASTICIDAD, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (MUY HÚMEDO)		5	77	18	25,70	3,06	22,64	26,70
10.00-10.50													
10.50-10.80	SPT	72		SM	ARENA LIMOSA, GRIS DE TONALIDAD CAFÉ, PREDOMINA GRANO MEDIO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		1	83	16	NP	NP	NP	25,82
10.80-11.00					ARENA LIMOSA, GRIS DE TONALIDAD VERDOZA, PREDOMINA GRANO MEDIO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		0	85	15	N.P	N.P	N.P	25,24
11.00-11.50													
11.50-11.68					ARENA LIMOSA, DE TONALIDAD GRIS, PREDOMINA GRANO FINO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		1	64	35	N.P	N.P	N.P	33,64
11.68-11.80	SPT	70			ARENA LIMOSA, DE TONALIDAD VERDE OSCURO, PREDOMINA GRANO MEDIO Y FINO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		1	77	22	N.P	N.P	N.P	33,79
11.80-12.00					ARENA LIMOSA, DE TONALIDAD GRIS, PREDOMINA GRANO FINO, SIN PLASTICIDAD, MUY HÚMEDO		0	51	49	N.P	N,P	N.P	36,40
12.00-12.50													
12.50-13.00	SPT	75		SC-SM	ARENA LIMOSA LIGERAMENTE ARCILLOSA, DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ OSCURO, PREDOMINA GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		0	52	48	27,01	5,91	21,10	29,75
13.00-13.50													
13.50-14.00	SPT	42		SM	ARENA LIMOSA, DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ DE TONALIDAD GRIS, PREDOMINA GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (MUY HÚMEDO)		3	57	40	27,9	5,13	22,8	35,93
14.00-14.50													
14.50-15.00	SPT	67			ARENA LIMOSA, DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ CLARO, PREDOMINA GRANO FINO, HUMEDAD ACTUAL MAYOR QUE EL LÍMITE PLÁSTICO (HÚMEDO)		2	60	38	31,59	4,07	27,53	33,67
LEYENDA:													
SPT = Ensayo SPT													
Sh = Muestra con Shelby													
= Perforación con barrenación													
N.F = Nivel Freático													
R = Rechazo (más de 50 golpes)													
N.P = No Plástico													
G% = Porcentaje de Grava													
S% = Porcentaje de Arena													
F% = Porcentaje de Finos													
LL = Límite Líquido													
IP = Índice de Plasticidad													
LP = Límite Plástico													

LEYENDA:

SPT = Ensayo SPT
Sh = Muestra con Shelby
 = Perforación con barrenación
N.F = Nivel Freático
R = Rechazo (más de 50 golpes)
N.P = No Plástico

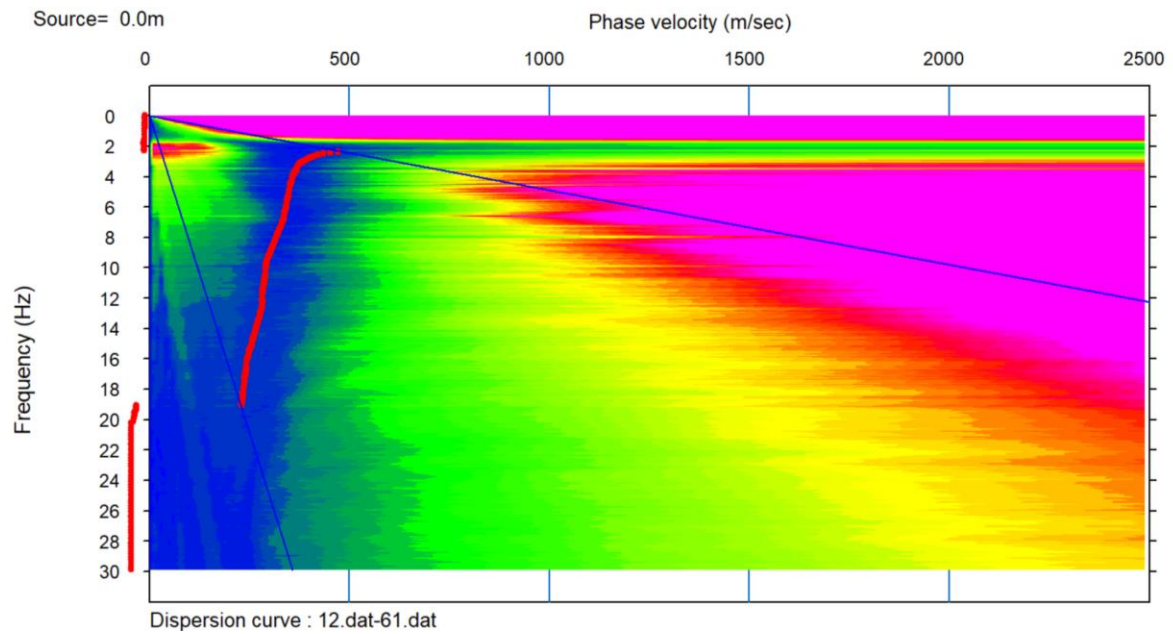
G% = Porcentaje de Grava
S% = Porcentaje de Arena
F% = Porcentaje de Finos
LL = Límite Líquido
IP = Índice de Plasticidad
LP = Límite Plástico

ESTRATOS GEOSÍSMICOS	INTERVALOS DE VELOCIDAD P	VELOCIDAD PROMEDIO P	CORRESPONDENCIA GEOLÓGICA APROXIMADA
A	Vp= 300 - 500 [m/s]	Vp= 400 [m/s]	Suelo blando, húmedo.
B	Vp= 500 - 1100 [m/s]	Vp= 800 [m/s]	Suelo blando a medianamente firme, húmedo.
C	Vp= 1100 - 1800 [m/s]	Vp= 1450 [m/s]	Suelo firme, muy húmedo.
D	Vp= 1800 - 2400 [m/s]	Vp= 2100 [m/s]	Suelo rígido.

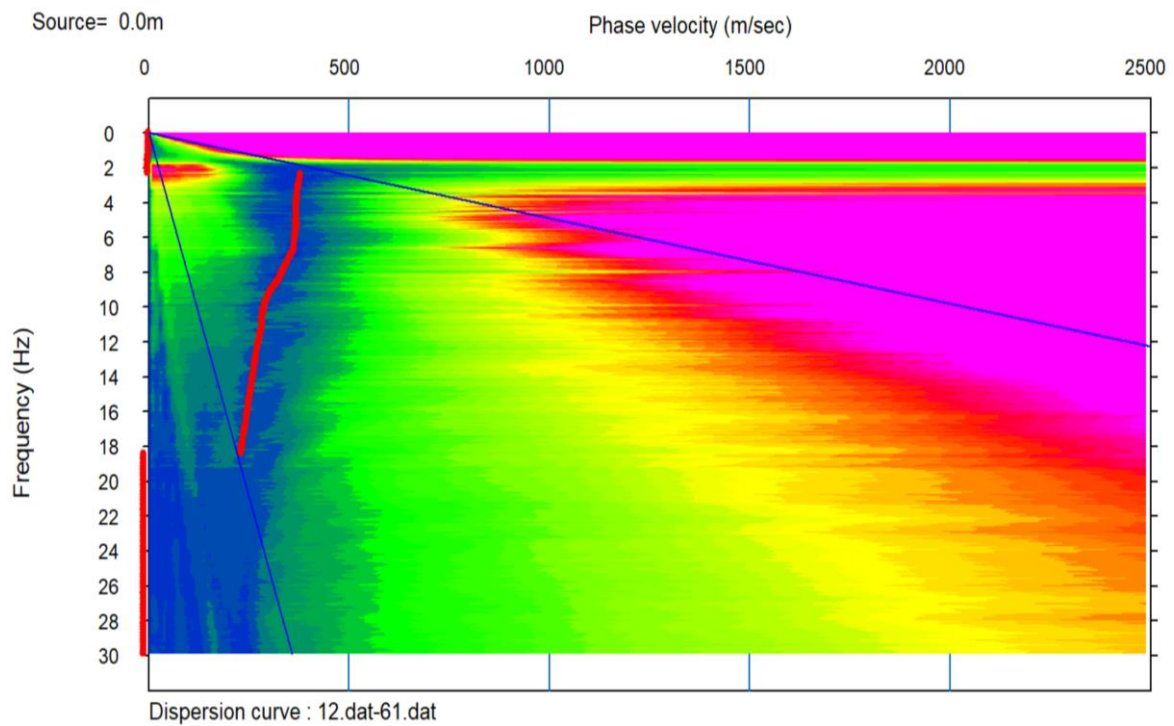
	Punto de Detonación
	Superficie del Terreno / Geófonos
Vp	Velocidad de Ondas Primarias
NO - SE	Dirección del Perfil
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar

Velocidades de onda de compresión (Vp) en la Universidad Politécnica Salesiana-Campus Sur, parte posterior del bloque G.

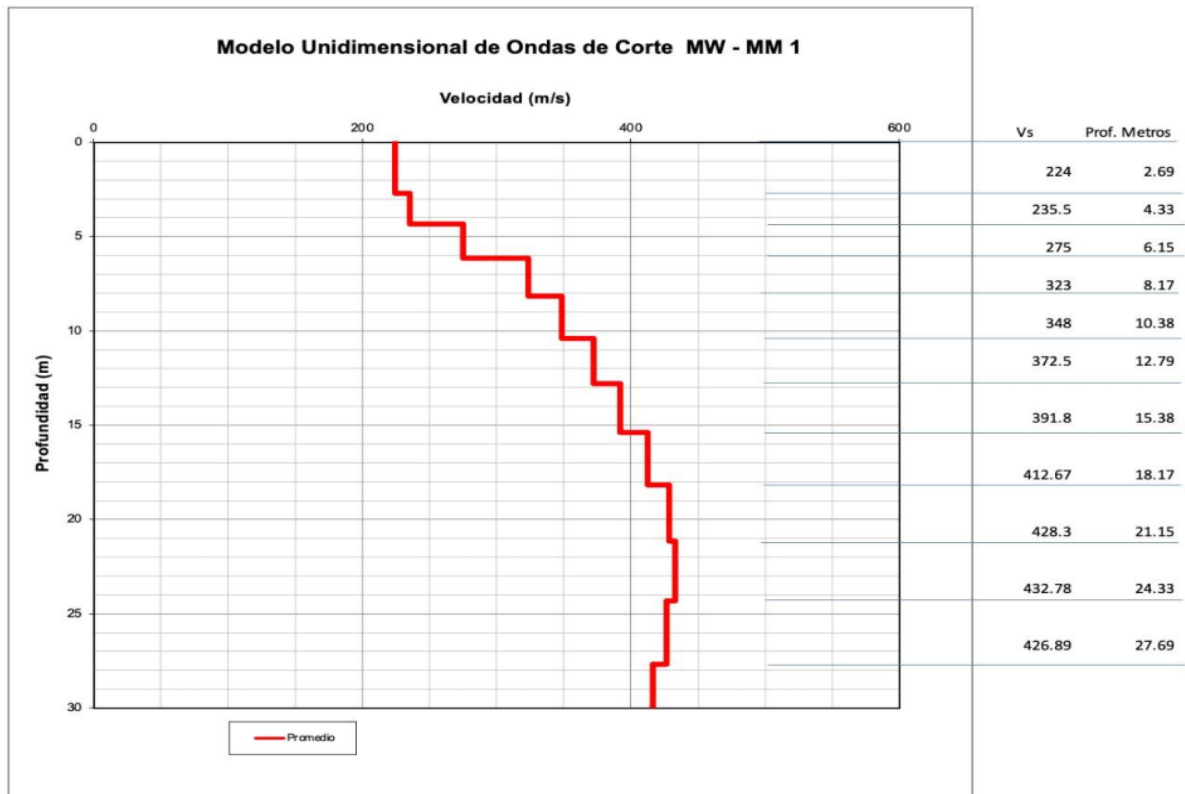
Anexo 4: Modelo Unidimensional de Ondas de Corte obtenido del ensayo MASW&MAM



Curva de dispersión velocidad de fase (m/s) vs frecuencia (Hz) para MASW, obtenido en el bloque G de la UPS.



Curva de dispersión velocidad de fase (m/s) vs frecuencia (Hz) para MAM, obtenido en el bloque G de la UPS.



Velocidades de onda de corte (V_s) en la Universidad Politécnica Salesiana-Campus Sur, parte posterior del Bloque G

Anexo 5: Datos utilizados para cada modelo analizado:

5.1. Angulo de fricción

Código	ϕ (°)	Prof.(m)	W (%)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	SUCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
SMG1	5.15	0.5	29.86	27.9	23.1	4.8	0	46	54	CL	400	224
P4	22	4.4	25.05	37	24	13	0	38	62	CL	350	224
SMQ1	34.09	3.74	35.54	43	29.4	13.6	8.6	23.9	67.5	CL	569.65	278.8
SMQ2	36.13	13.225	22.8	37.8	17.4	20.4	6	29.8	64.2	CL	758.8	308.61
SMQ3	14.9	1.7	31.47	33.6	24.6	9	8.1	27	64.9	ML	562.8	268.2
SMQ4.1	21.5	2.40	28.17	36.1	23.5	12.6	6.8	23.8	69.4	CL	573.7	242.6
SMQ4.2	35.65	14.225	34.99	33.3	27.1	6.2	23.7	28.7	47.6	SM	1398.8	352.3
SMQ5	20.8	6.125	25.38	38.9	18.8	20.1	6.5	22.8	70.7	CL	502.5	203.4
SMQ7	24.2	3.75	17.87	36.4	20.5	15.9	4.9	33.1	62	CL	364.4	169.25
SMQ12	34.3	6.20	46.42	46.3	35	11.3	21	33.2	45.8	SM	620.3	228.1

5.2. Cohesión:

Código	C (kg/cm2)	Prof.(m)	W (%)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	SUCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
SMG1	0.52	0.5	29.86	27.9	23.1	4.8	0	46	54	CL	400	224
SMG2	0.35	1.5	26.65	31	23	8	0	39	61	ML	800	275
SMG3	0.43	2	25.69	28	24	4	0	49	51	ML	1110	323
SMQ1	2.41	3.74	35.54	43	29.4	13.6	8.6	23.9	67.5	CL	569.65	278.8
SMQ2	0.23	13.225	22.8	37.8	17.4	20.4	6	29.8	64.2	CL	758.8	308.61
SMQ3	0.3	1.7	31.47	33.6	24.6	9	8.1	27	64.9	ML	562.8	268.2
SMQ4.1	0.305	2.40	28.17	36.1	23.5	12.6	6.8	23.8	69.4	CL	573.7	242.6
SMQ4.2	1.27	14.225	34.99	33.3	27.1	6.2	23.7	28.7	47.6	SM	1398.8	352.3
SMQ5	1.12	6.125	25.38	38.9	18.8	20.1	6.5	22.8	70.7	CL	502.5	203.4
SMQ7	0.11	3.75	17.87	36.4	20.5	15.9	4.9	33.1	62	CL	364.4	169.25

5.3. Módulo de elasticidad:

Código	E50 (kg/cm2)	Esf. Confinamiento (kg/cm2)	Prof.(m)	W (%)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	SUCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
SMQ3	50.74	0.7	1.55	28.58	33.6	24.6	9	8.1	27	64.9	ML	562.8	268.2
SMQ3	79.12	1.41	1.55	28.82	33.6	24.6	9	8.1	27	64.9	ML	562.8	268.2
SMQ3	193.66	2.81	1.55	30.36	33.6	24.6	9	8.1	27	64.9	ML	562.8	268.2
SMQ4.1	73.49	0.70	2.40	28.09	36.1	23.5	12.6	6.8	23.8	69.4	CL	573.70	242.60
SMQ4.1	152.73	1.41	2.40	30.74	36.1	23.5	12.6	6.8	23.8	69.4	CL	573.70	242.60
SMQ4.1	187.50	2.81	2.40	29.29	36.1	23.5	12.6	6.8	23.8	69.4	CL	573.70	242.60
SMQ5	193.86	0.70	6.125	25.25	38.9	18.8	20.1	6.5	22.8	70.7	CL	502.50	203.40
SMQ5	219.69	1.41	6.125	25.65	38.9	18.8	20.1	6.5	22.8	70.7	CL	502.50	203.40
SMQ5	292.85	2.81	6.125	23.71	38.9	18.8	20.1	6.5	22.8	70.7	CL	502.50	203.40

SMQ6	103.95	0.70	5.25	23.59	0	0	0	12.5	38.0	49.5	SM	505.60	203.10
SMQ6	171.89	1.41	5.25	23.64	0	0	0	12.5	38.0	49.5	SM	505.60	203.10
SMQ6	442.09	2.81	5.25	17.65	0	0	0	12.5	38.0	49.5	SM	505.60	203.10
SMQ7	186.31	0.70	3.75	17.92	36.4	20.5	15.9	4.9	33.1	62.0	CL	364.40	169.25
SMQ7	216.63	1.41	3.75	17.92	36.4	20.5	15.9	4.9	33.1	62.0	CL	364.40	169.25
SMQ7	294.42	2.81	3.75	20.73	36.4	20.5	15.9	4.9	33.1	62.0	CL	364.40	169.25
SMQ11	35.37	1.41	6.80	44.73	52.5	42.3	10.2	2.3	18.5	79.2	MH	500.25	249.15
SMQ11	41.70	2.81	6.80	45.20	52.5	42.3	10.2	2.3	18.5	79.2	MH	500.25	249.15
SMQ12	84.73	0.70	6.20	46.82	46.3	35	11.3	21.0	33.2	45.8	SM	620.30	228.10
SMQ12	173.60	1.41	6.20	46.26	46.3	35	11.3	21.0	33.2	45.8	SM	620.30	228.10
SMQ12	397.64	2.81	6.20	46.18	46.3	35	11.3	21.0	33.2	45.8	SM	620.30	228.10
SMQ64	39.39	0.70	5.54	30.95	38.8	18.3	20.5	4.8	17.8	77.4	CL	609.24	284.15
SMQ64	43.85	1.41	5.54	31.49	38.8	18.3	20.5	4.8	17.8	77.4	CL	609.24	284.15
SMQ64	56.50	2.81	5.54	32.83	38.8	18.3	20.5	4.8	17.8	77.4	CL	609.24	284.15

5.4. Número de golpes:

Código	Nº Golpes SPT	Prof.(m)	w (%)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	SUCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
SMG3	19	2.00	24.04	29.2	22.5	6.7	0	53	47	SM	500.00	224.00
SMG5	23	3.50	23.64	29.8	23	6.8	2	68	30	SM	675.00	235.50
SMG11	45	8.00	30.11	27.8	24.7	3.05	0.5	71	28.5	SM	1170.00	348.00
SMG13	50	9.50	2.6	25.7	22.6	3.1	5	77	18	SM	1300.00	348.00
SMQ64.2	17	5.54	28.57	38.8	18.3	20.5	4.8	17.8	77.4	CL	609.24	284.15
SMQ3.2	18	7.55	31.79	31.3	20.6	10.7	20.2	28.5	51.3	CL	484.94	284.42
SMQ9.2	21	8.66	24.16	27.9	20.9	7	12.2	29.3	58.5	CL	573.10	269.32
SMQ9.3	34	11.58	25.57	30.3	23.9	6.4	28	26.2	45.8	SM	836.37	331.85
SMQ9.4	50	14.18	31.85	28.7	22.4	6.3	31.6	29	39.4	SM	1283.21	365.50
SMQ9.5	50	22.23	25.95	0	0	0	28.2	26.5	45.3	SM	1712.87	410.43
SMQ10.3	26	10.55	25.19	28.5	18.4	10.1	4.1	27.1	68.8	CL	394.30	191.30
SMQ11.1	9	3.00	19.16	0	0	0	21.4	42.1	36.5	SM	387.60	184.70
SMQ11.2	26	8.00	87.19	94.3	70.8	23.5	3.1	18.2	78.7	MH	563.90	330.90
SMQ11.4	37	15.50	22.66	33.8	23.6	10.2	22.3	31.2	46.5	SC	716.25	340.75
SMQ12.6	50	21.00	29.07	0	0	0	36.3	33.4	30.3	SM	1063.10	452.00
SMQ12.7	50	23.00	33.76	34.7	25.2	9.5	23	28.7	35.4	SM	1083.70	478.50
SMQ12.8	44	26.00	24.72	20.3	17.6	2.7	34.5	30.1	57.8	ML	1060.60	485.50
SMQ5.1	10	2.11	23.87	27.4	19.4	8	14.5	27.7	60	CL	488.50	191.00
P3.1	30	1.30	30	43	25	18	0	40	14	SM	400.00	224.00
P3.9	27	9.30	27	0	0	0	1	85	25	SM	1300.00	348.00
P4.3	25	3.30	25	29	21	8	2	73	25	SC	675.00	235.50
P4.8	30	8.30	30	26	23	3	4	47	49	SM	1170.00	348.00
P4.9	30	9.30	30	34	23	11	5	53	42	SC	1300.00	348.00
P4.10	26	10.30	26	26	20	6	2	49	49	SC-SM	1400.00	372.50

5.5. Velocidad de onda de corte:

Código	Vs (m/s)	Prof.(m)	Nspt	w (%)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	SUCS	Vp (m/s)
SMG12	348.00	6.00	66	28.56	25.7	22.6	3.1	0.0	66.0	34.0	SM	1210.0
SMG16	391.80	12.50	75	29.75	27	21.2	5.9	0.0	52.0	48.0	SC-SM	1600.0
SMG18	391.80	14.50	67	33.67	31.6	27.5	4.1	2.0	60.0	38.0	SM	1710.0
SMQ8.3	352.95	17.55	20	25.81	0.0	0.0	0.0	40.6	42.0	17.4	SM	1084.3
SMQ2.5	354.28	22.23	19	19.77	0.0	0.0	0.0	67.5	17.4	15.1	SM	1978.1
SMQ2.6	432.68	24.23	36	23.11	0.0	0.0	0.0	55.2	27.8	17.0	SM	1654.5
SMQ9.2	269.32	8.66	21	24.16	27.9	20.9	7.0	12.2	29.3	58.5	CL	573.1
SMQ9.3	331.85	11.58	34	25.57	30.3	23.9	6.4	28.0	26.2	45.8	SM	836.3
SMQ9.5	410.43	22.23	50	25.95	0.0	0.0	0.0	28.2	26.5	45.3	SM	1712.8
SMQ12.1	229.30	2.00	8	31.7	42.6	23.2	19.4	18.6	25.1	56.3	CL	620.6
SMQ2.1	254.20	2.83	26	24.81	37.7	23.4	14.3	9.3	23.9	66.8	CL	428.4
SMQ3.4	321.56	7.78	50	39.4	38.2	27.3	10.9	18.6	20.6	60.8	ML	554.7
SMQ4.2	271.70	9.85	12	26.01	25.5	20.4	5.1	6.9	28.2	64.9	CL-ML	926.2
SMQ4.3	517.2	14.23	50	34.99	33.3	27.0	6.22	23.7	28.7	41.6	SM	1376.7
P3.1	224.00	1.30	15	30	43	25	18.0	0.0	40.0	60.0	CL	400.0
P3.3	224.00	3.30	12	28	31	18	13.0	5.0	35.0	60.0	CL	675.0
P4.1	224.00	1.30	6	26	37	24	13.0	0.0	74.0	26.0	CL	400.0
P4.2	224.00	2.30	10	27	37	24	13.0	0.0	73.0	27.0	CL	550.0
P4.10	323.00	10.30	50	26	26	20	6.0	2.0	49.0	49.0	CL	1400.0
P5.4	224.00	4.30	7	30	33	25	8.0	9.0	40.0	51.0	SM	800.0

Anexo 6: Resultados estadísticos de modelo ANOVA

Resultados estadísticos del modelo ANOVA para Módulo de elasticidad.

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Esfuerzo de confinamiento	1	59978	59978	15.545	0.0013
% Humedad	1	31267	31267	8.103	0.0122
Índice de Plasticidad	1	9461	9461	2.452	0.1382
% Grava	1	84262	84262	21.838	0.0003
% Arena	1	8893	6242	2.305	0.1498
Velocidad de onda de compresión	1	16353	16353	4.238	0.0573
Velocidad de onda de corte	1	929	929	0.241	0.6308

Resultados estadísticos del modelo ANOVA para Número de Golpes.

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
% Humedad	1	0.6	0.6	0.047	0.8307
Límite Líquido	1	921.9	921.9	71.278	4.41e-07
Límite Plástico	1	641.3	641.3	49.585	3.99e-06
Índice de plasticidad		10.7	10.7	0.830	0.3765
% Grava	1	52.2	52.2	4.038	0.0628
% Arena	1	266.2	266.2	20.582	0.0003
Velocidad de onda de compresión	1	2805.1	2805.1	216.669	2.53e-10
Velocidad de onda de corte	1	306.3	306.3	23.912	0.0001

Resultados estadísticos del modelo ANOVA para Velocidad de onda de corte.

Variables	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Golpes	1	54092	24092	186.052	1.15e-08
% Humedad	1	11763	11763	40.458	3.61e-05
Índice de Plasticidad	1	14948	14948	51.416	1.13e-05
% Grava	1	8260	8260	28.410	0.0001
% Arena	1	208	208	0.716	0.4139
% de Finos	1	1117	1117	3.842	0.0736

Anexo 7: Resumen de resultados de regresión lineal múltiple

Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con variable Ángulo de fricción.

Coefficiente	Valor Coeficiente	Error estándar	Valor estándar	Pr(> t)
Intercepto	-51.763679	15.423134	-3.356	0.0201
% Humedad	-0.323692	0.238020	-1.360	0.2319
Límite líquido	1.895836	0.324677	5.839	0.0020
% Grava	-0.342294	0.443439	-0.772	0.4750
Velocidad de onda de compresión	0.031133	0.008923	3.489	0.0174
Error residual estándar	R² ajust	P-value	Índice de fijación	
3.585 en 5 grados de libertad	0.88	0.004046	17.07 en 4 y 5 grados de libertad	

Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con variable Cohesión.

Coefficiente	Valor Coeficiente	Error estándar	Valor estándar	Pr(> t)
Intercepto	-9.969730	2.478103	-4.023	0.0100
% Humedad	0.103275	0.021414	4.823	0.0047
Límite líquido	0.175800	0.045158	3.893	0.0114
% Arena	0.058757	0.023403	2.511	0.0537
Velocidad de onda de corte	-0.000623	0.001125	-0.554	0.6035
Error residual estándar	R² ajust	P-valué	Índice de fijación	
0.3279 en 5 grados de libertad	0.79	0.01547	9.304 en 4 y 5 grados de libertad	

Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con variable Módulo de elasticidad.

Coefficiente	Valor Coeficiente	Error estándar	Valor estándar	Pr(> t)
Intercepto	294.2933	89.4875	3.289	0.0040
Esfuerzo de confinamiento	65.6722	15.1210	4.343	0.0003
% Humedad	-6.2234	1.5976	-3.895	0.0010
% Grava	14.9159	2.8623	5.211	5.89e-05
Velocidad de onda de compresión	-0.3583	0.1806	-1.984	0.0626
Error residual estándar	R²ajust	P-value	Índice de fijación	
67.72 en 18 grados de libertad	0.6783	4.624e-05	12.6 en 4 y 18 grados de libertad	

Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con variable Velocidad de onda de corte.

Coefficiente	Valor Coeficiente	Error estándar	Valor estándar	Pr(> t)
Intercepto	244.8980	34.5016	7.098	5.35e-06
Golpes	2.1604	0.2909	7.426	3.22e-06
% Humedad	-0.1003	1.3845	-0.072	0.9432
Índice de plasticidad	-3.4344	1.2466	-2.755	0.1548
% Grava	1.4727	0.3005	4.901	0.0002
Error residual estándar	R² ajust	P-value	Índice de fijación	
18.54 en 14 grados de libertad	0.9341	7.126e-09	64.75 en 4 y 14 grados de libertad	

Anexo 8: Verificación de supuestos residuales.

El factor de inflación de varianza (VIF), para cada término del modelo, mide el efecto combinado que tienen las dependencias entre los regresores sobre la varianza de este término. Si hay uno o más VIF que sean mayores a diez es un indicio de colinealidad.

Supuestos, prueba y nivel de significancia, modelo de regresión lineal múltiple para Ángulo de Fricción.

	Supuestos Residuales	Prueba	p-value (>0.05)
ANOVA	Independencia	Durbin-Watson	0.12
	Normalidad	Shapiro-Wilk	0.13
	Homocedasticidad	Breush-Pagan Test	0.57
RLM		Prueba de rachas	0.50
	Independencia	Colinealidad	VIF < 10
	Normalidad	Jarque-Bera	0.13
	Homocedasticidad	Puntuación de varianza neoconstante	0.82

Supuestos, prueba y nivel de significancia, modelo de regresión lineal múltiple para variable Módulo de elasticidad.

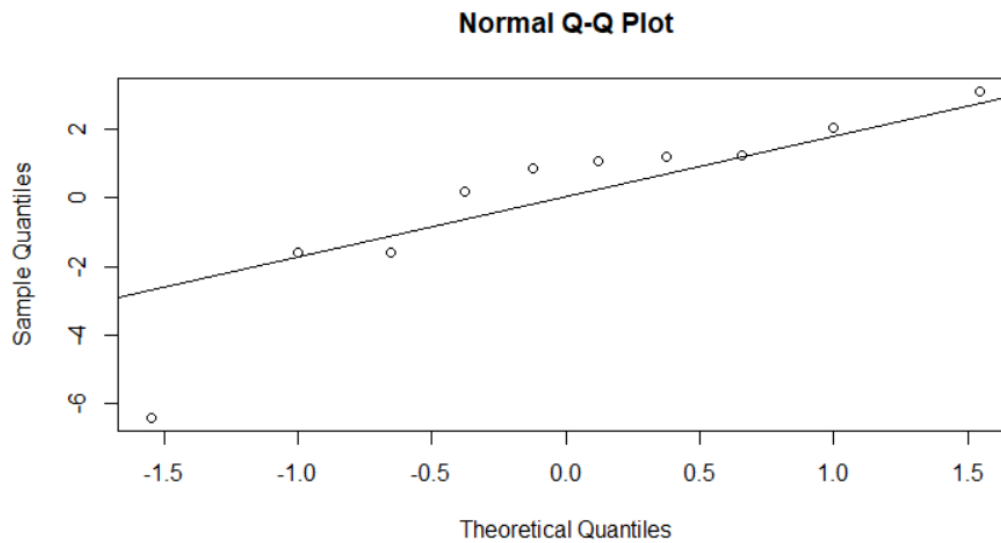
	Supuestos Residuales	Prueba	p-value (>0.05)
ANOVA	Independencia	Durbin-Watson	0.14
	Normalidad	Shapiro-Wilk	0.99
	Homocedasticidad	Breush-Pagan Test	0.12
RLM		Prueba de rachas	0.28
	Independencia	Colinealidad	VIF < 10
	Normalidad	Jarque-Bera	0.63
	Homocedasticidad	Puntuación de varianza neoconstante	0.29

Supuestos, prueba y nivel de significancia modelo de regresión lineal múltiple para variable Velocidad de onda de corte

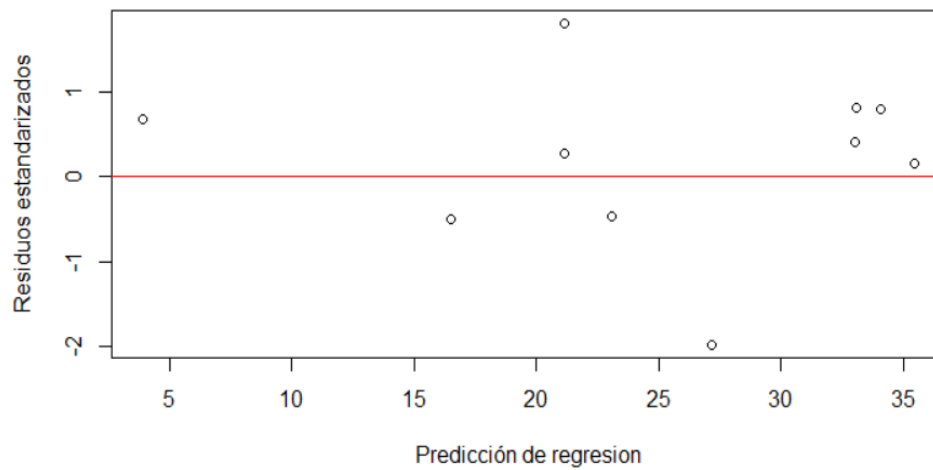
	Supuestos Residuales	Prueba	p-value (>0.05)
ANOVA	Independencia	Durbin-Watson	0.15
	Normalidad	Shapiro-Wilk	0.96
	Homocedasticidad	Breush-Pagan Test	0.09
RLM		Prueba de rachas	0.46
	Independencia	Colinealidad	VIF < 10
	Normalidad	Jarque-Bera	0.73

Homocedasticidad	Puntuación de varianza neoconstante	0.07
------------------	---	------

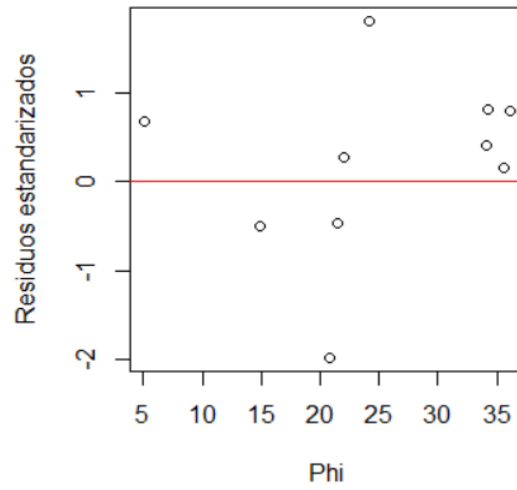
Anexo 9: Análisis gráfico de supuestos residuales regresión múltiple.



Verificación gráfica de test de normalidad para ángulo de fricción.

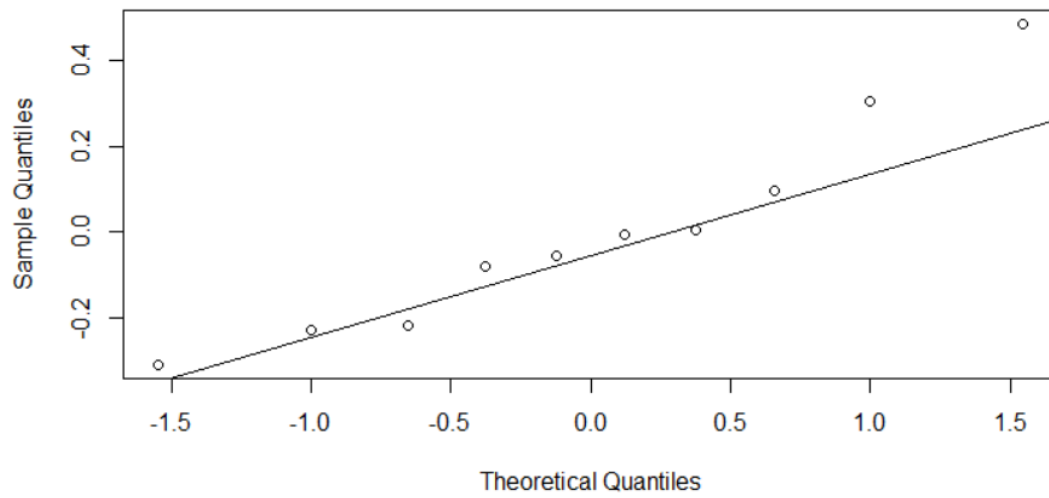


Verificación gráfica de test de Homocedasticidad para ángulo de fricción.

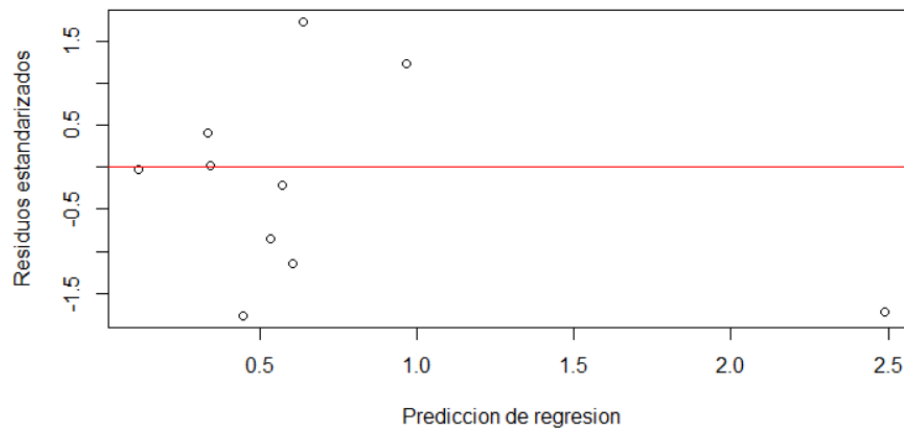


Verificación gráfica de test de Independencia para ángulo de fricción.

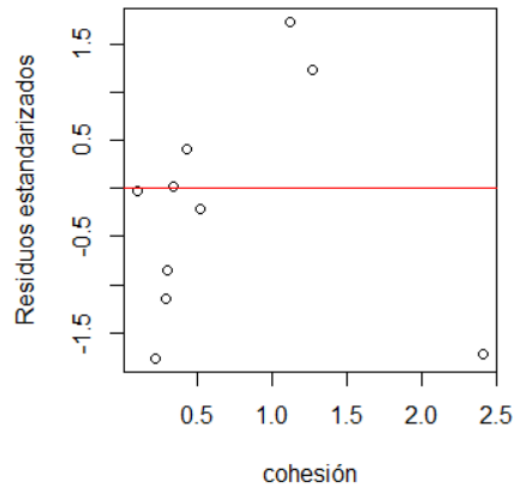
Normal Q-Q Plot



Verificación gráfica de test de normalidad para Cohesión.

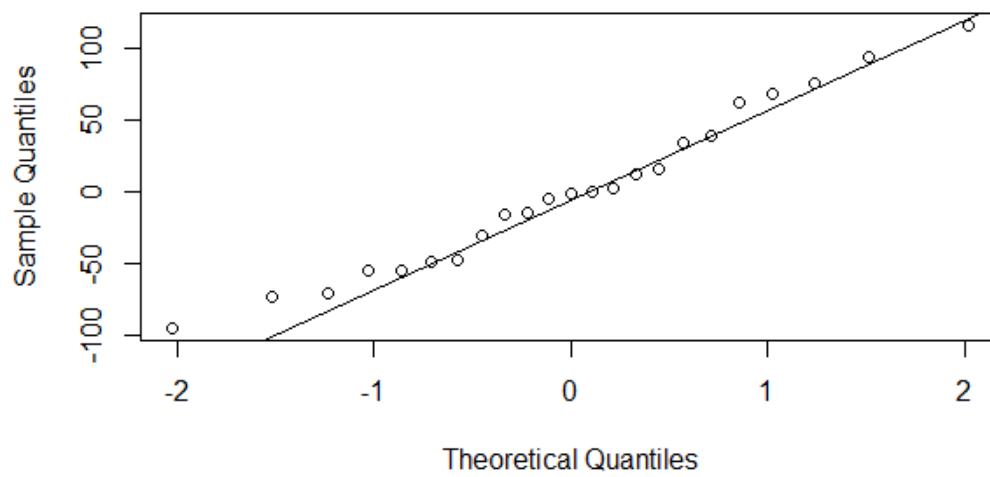


Verificación gráfica de test de Homocedasticidad para Cohesión.

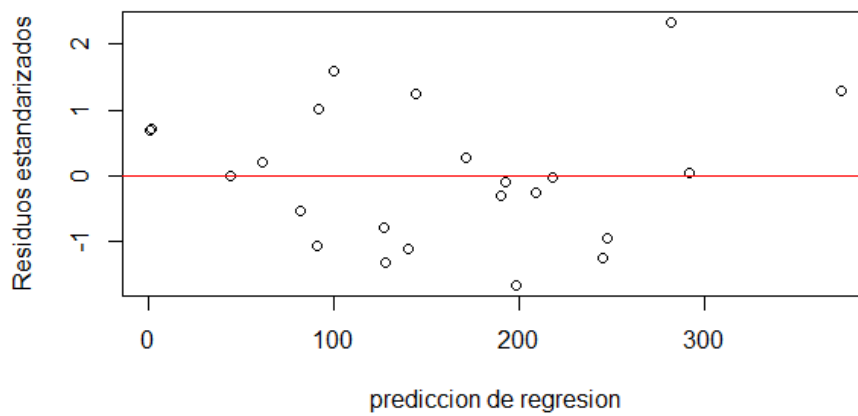


Verificación gráfica de test de Independencia para Cohesión.

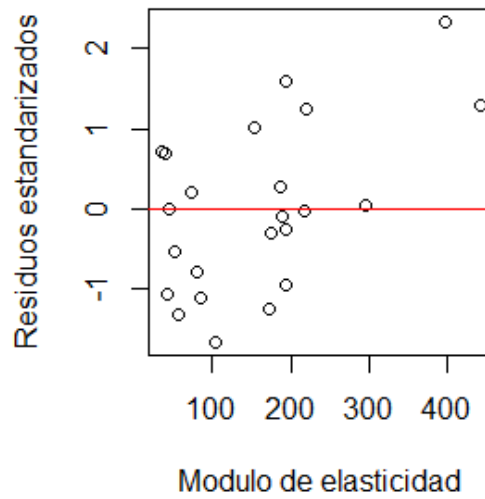
Normal Q-Q Plot



Verificación gráfica de test de normalidad para Módulo de elasticidad.

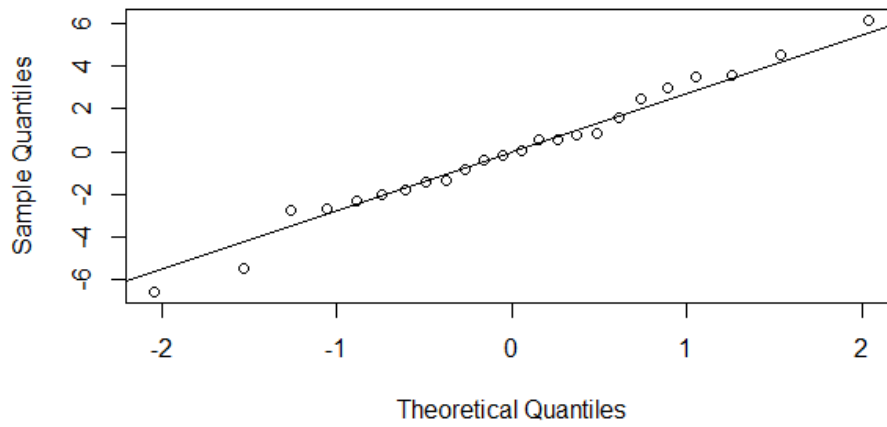


Verificación gráfica de test de Homocedasticidad para Módulo de elasticidad.

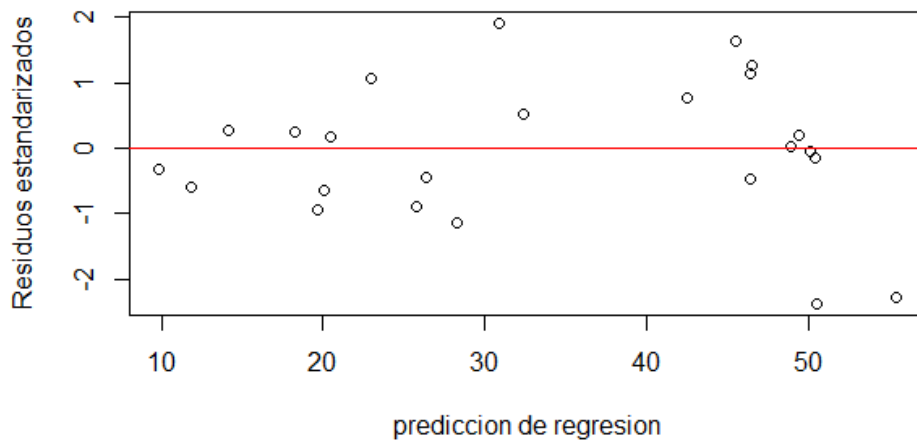


Verificación gráfica de test de Independencia para Módulo de elasticidad.

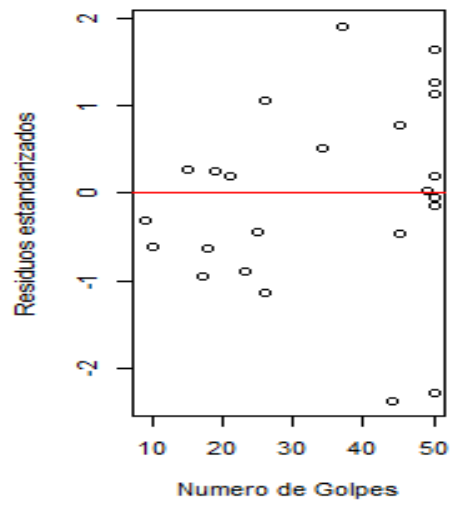
Normal Q-Q Plot



Verificación gráfica de test de normalidad para Número de golpes.

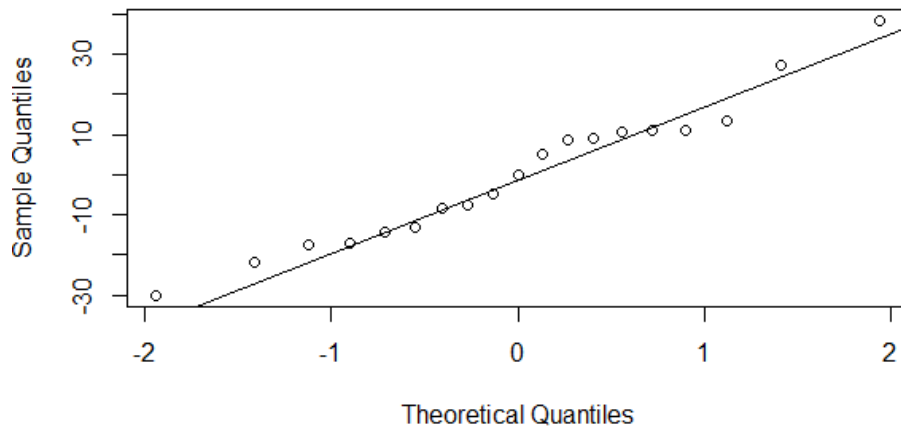


Verificación gráfica de test de Homocedasticidad para Número de golpes.

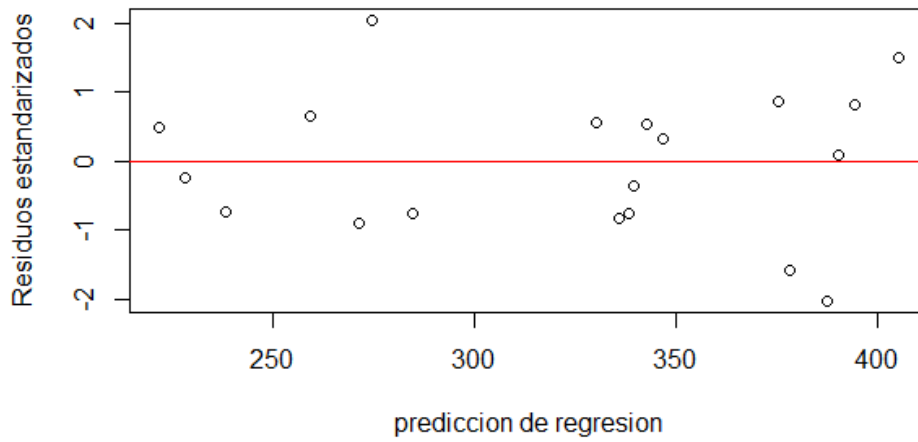


Verificación gráfica de test de Independencia para Número de golpes.

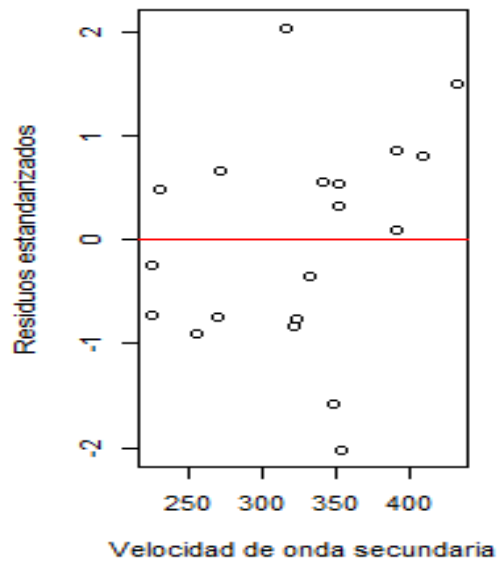
Normal Q-Q Plot



Verificación gráfica de test de normalidad para Velocidad de onda de corte.



Verificación gráfica de test de Homocedasticidad para Velocidad de onda de corte.



Verificación gráfica de test de Independencia para Velocidad de corte.

Anexo 10: Resultados intervalos de confianza.

Niveles de confianza de variables de la ecuación de correlación con variable ángulo de Fricción.

	Lím. Inferior	Lím. Superior
% Humedad	24.53	34.97
Límite líquido	33.68	40.37
% Grava	3.42	13.70
Velocidad de onda de compresión	411.31	808.87

Niveles de confianza de variables de la ecuación de correlación con variable Cohesión.

	Lím. Inferior	Lím. Superior
% Humedad	23.82	31.85
Límite líquido	31.07	38.16
% Arena	25.35	39.26
Velocidad de onda de corte	224.74	371.00

Niveles de confianza de variables de la ecuación de correlación con variable Número de Golpes.

	Lím. Inferior	Lím. Superior
Limite Plástico	11.27	29.22
% Grava	4.59	20.88
% Arena	29.26	55.05
Velocidad de onda de compresión	640.07	1137.25
Velocidad de onda de corte	268.54	377.61

Niveles de confianza de variables de la ecuación de correlación con variable Velocidad de onda de Corte.

	Lím. Inferior	Lím. Superior
% Humedad	24.99	30.29
Golpes	16.79	44.68
Índice de plasticidad	3.97	11.52
Grava	3.66	28.45

Anexo 11: Resultado de análisis de diferencia de medias.

Resumen de prueba T-Student Ángulo de Fricción.

t = -0.22241	Grados de libertad=18	p-value = 0.8265
Diferencia Medias	phi	phi correlacionada
Nivel de confianza de 95%	-9.446913	9.446913
Media de muestras	24.872	24.872

Resumen de prueba T-Student Módulo de Elasticidad.

t = -0.032908	Grados de libertad=39	p-value = 0.9739
Diferencia Medias	E50	E50 correlacionada
Nivel de confianza de 95%	-61.28134	61.28134
Media de muestras	157.9004	157.9004

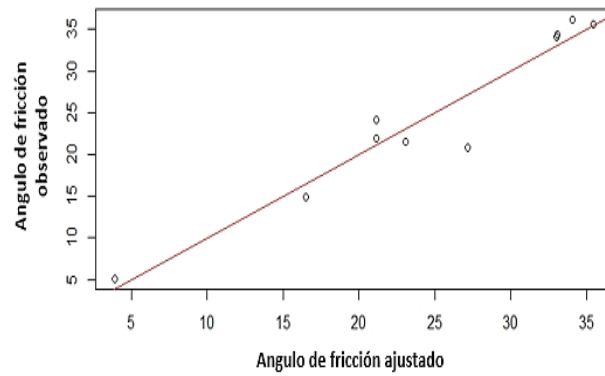
Resumen de prueba T-Student Número de Golpes.

t = -0.23274	Grados de libertad=46	p-value = 0.817
Diferencia Medias	Golpes	Golpes correlacionados
Nivel de confianza de 95%	-8.649	8.649
Media de muestras	33.875	33.875

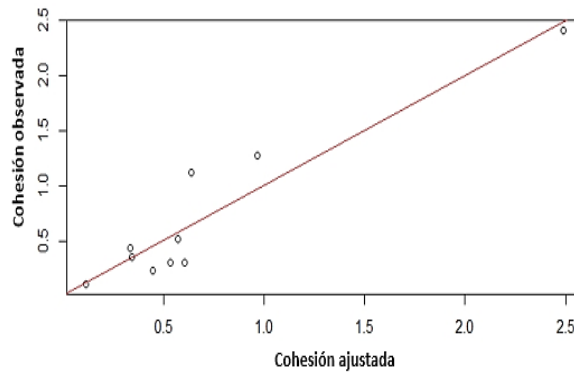
Resumen de prueba T-Student Velocidad de onda de Corte.

t = -0.043237	Grados de libertad=36	p-value = 0.9658
Diferencia Medias	Vs	Vs correlacionada
Nivel de confianza de 95%	-46.90719	46.90719
Media de muestras	305.4142	305.4142

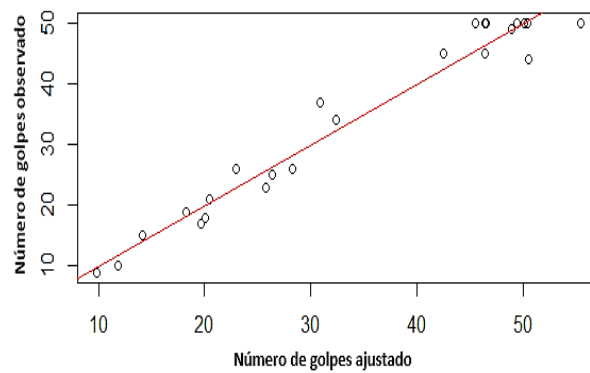
Anexo 12: Gráficas entre variable dependientes calculadas y ajustadas



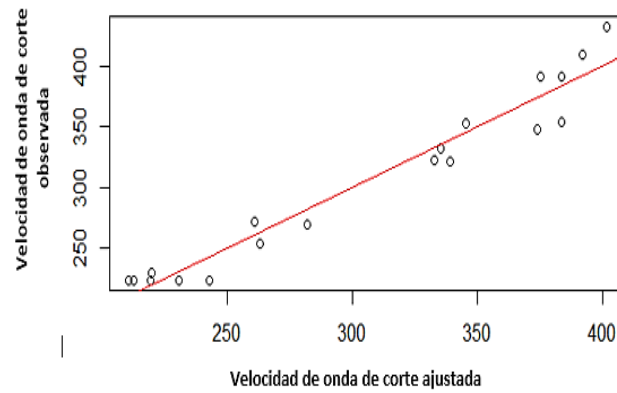
Gráfica de ángulo de fricción calculado vs ángulo de fricción ajustado.



Gráfica de cohesión calculada vs cohesión ajustada.



Gráfica número de golpes calculado vs número de golpes ajustado.



Gráfica de velocidad de onda de corte calculada vs velocidad de onda de corte ajustada.

Anexo 13: Diagrama de cajas

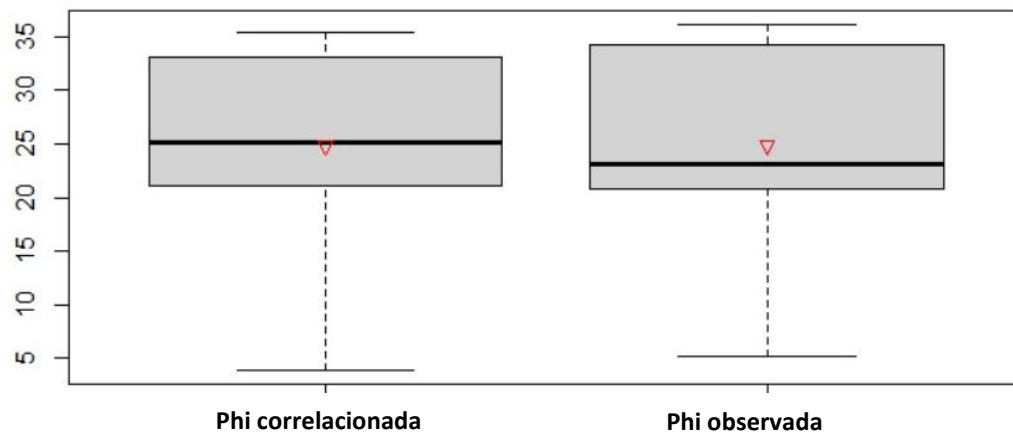


Diagrama de cajas para ángulo de fricción.

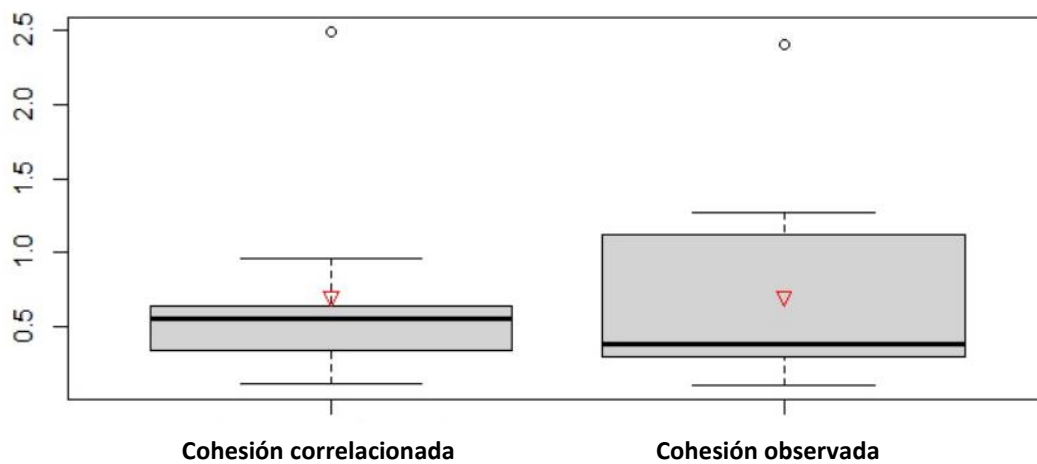


Diagrama de cajas para cohesión

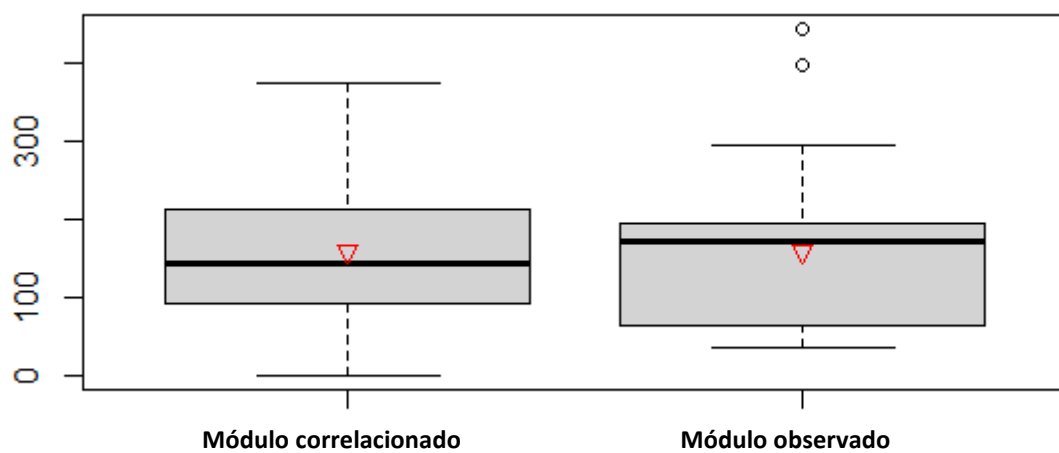


Diagrama de cajas para módulo de elasticidad.

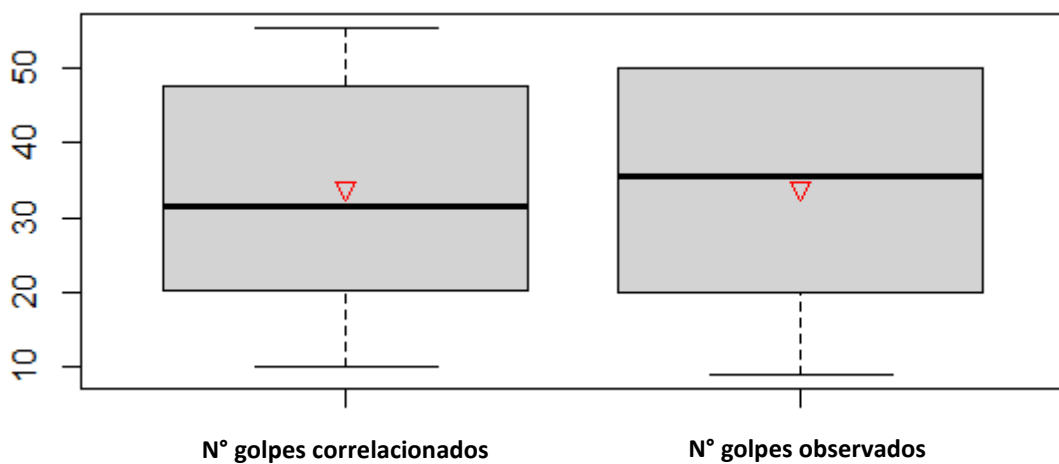


Diagrama de cajas para número de golpes.

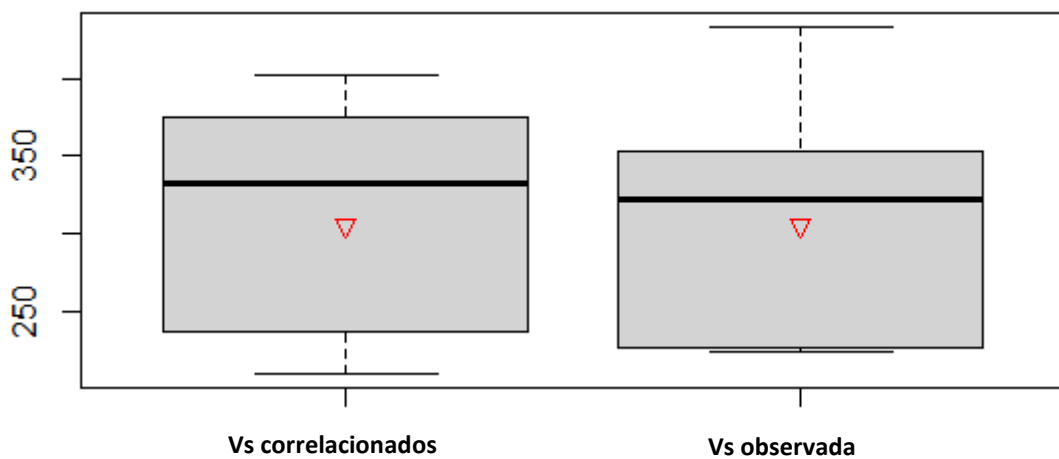


Diagrama de cajas para velocidad de onda de corte

Anexo 14: Resultados de los errores

Resultados del ángulo de fricción calculado y el ángulo de fricción ajustado con su error estándar.

Código	Ángulo de Fricción (°)	Ángulo de fricción correlacionado (°)	Error %
SMG1	5.15	3.92	23.92
P4	22	21.17	3.77
SMQ1	34.09	33.04	3.06
SMQ2	36.13	34.09	5.64
SMQ3	14.9	16.49	10.73
SMQ4.1	21.50	23.09	7.40
SMQ4.2	35.65	35.48	0.48
SMQ5	20.8	27.18	30.71
SMQ7	24.2	21.13	12.69
SMQ12	34.3	33.11	3.46

Resultados de la cohesión calculada y la cohesión ajustado con su error estándar.

Código	Cohesión (Kg/cm2)	Cohesión correlacionado (Kg/cm2)	Error %
SMG1	0.52	0.57	10.25
SMG2	0.35	0.34	1.79
SMG3	0.43	0.33	22.18
SMQ1	2.41	2.49	3.34
SMQ2	0.23	0.44	94.15
SMQ3	0.3	0.60	102.17
SMQ4.1	0.305	0.53	74.80
SMQ4.2	1.27	0.96	24.03
SMQ5	1.12	0.64	43.09
SMQ7	0.11	0.11	3.90

Resultados de módulo de elasticidad calculado y módulo de elasticidad ajustado con su error estándar.

Código	Módulo de elasticidad (Kg/cm2)	Módulo de elasticidad correlacionado (Kg/cm2)	Error %
SMQ4.1	73.49	61.30	16.58
SMQ4.1	152.73	91.43	40.13
SMQ4.1	187.50	132.39	2.61
SMQ3	50.74	84.54	60.71
SMQ3	79.12	126.67	60.11
SMQ3	193.66	209.03	7.94
SMQ5	193.86	100.01	48.41
SMQ5	219.69	144.15	34.38

Código	Módulo de elasticidad (Kg/cm2)	Módulo de elasticidad correlacionado (Kg/cm2)	Error %
SMQ5	292.85	248.16	28.68
SMQ6	103.95	198.72	91.17
SMQ6	171.89	245.04	42.55
SMQ6	442.09	374.26	15.34
SMQ7	186.31	171.25	8.08
SMQ7	216.63	217.87	0.57
SMQ7	294.42	292.33	0.70
SMQ11	35.37	1.68	95.26
SMQ11	41.70	90.69	117.48
SMQ12	84.73	139.84	65.04
SMQ12	173.60	189.95	9.42
SMQ12	397.64	282.39	28.98
SMQ64	39.39	0.93	97.63
SMQ64	43.85	44.19	0.79
SMQ64	56.50	127.80	126.19

Resultados del número de golpes calculado y el número de golpes ajustado con su error estándar.

Código	Número de Golpes	Número de Golpes correlacionado	Error
SMG3	19	18.23	4.03
SMG5	23	25.73	11.86
SMG11	45	46.45	3.22
SMG13	50	50.40	0.81
SMQ64.2	17	19.63	15.49
SMQ3.2	18	20.03	11.28
SMQ9.2	21	20.40	2.84
SMQ9.3	34	32.38	4.74
SMQ9.4	50	45.51	8.99
SMQ9.5	50	55.44	10.88
SMQ10.3	26	22.98	11.60
SMQ11	9	9.86	9.61
SMQ11.2	26	28.28	8.80
SMQ11.4	37	30.87	16.55
SMQ12.6	50	46.53	6.93
SMQ12.7	50	50.16	0.31
SMQ12.8	44	51.11	16.17
SMQ5.1	10	11.78	17.85
P3.1	15	14.15	5.63
P3.9	49	48.92	0.15
P4.3	25	26.34	5.37
P4.8	45	42.51	5.53
P4.9	50	46.43	7.14
P41.0	50	49.40	1.18

Anexo 15: Análisis estadístico de datos reales, correlacionados y errores relativos.

Resumen estadístico entre ángulo de Fricción calculado y el ángulo de Fricción ajustado con el error estándar existente entre las dos muestras.

Ángulo de Fricción (°)		Ángulo de Fricción Correlacionado (°)		Error (%)	
Mínimo	5.15	Mínimo	3.91	Mínimo	0.48
1er Cuantil	20.98	1er Cuantil	21.13	1er Cuantil	3.54
Mediana	23.10	Mediana	25.14	Mediana	6.52
Media	24.87	Media	24.87	Media	10.18
3er Cuantil	34.25	3er Cuantil	33.09	3er Cuantil	12.20
Máximo	36.13	Máximo	35.47	Máximo	30.71

Resumen estadístico entre Cohesión calculado y Cohesión ajustado con el error estándar existente entre las dos muestras.

Cohesión (kg/cm ²)		Cohesión Correlacionado (kg/cm ²)		Error (%)	
Mínimo	0.11	Mínimo	0.11	Mínimo	1.79
1er Cuantil	0.30	1er Cuantil	0.36	1er Cuantil	5.49
Mediana	0.39	Mediana	0.55	Mediana	23.10
Media	0.70	Media	0.70	Media	37.97
3er Cuantil	0.97	3er Cuantil	0.62	3er Cuantil	66.87
Máximo	2.41	Máximo	2.49	Máximo	102.17

Resumen estadístico entre Módulo de elasticidad calculado y Módulo de elasticidad ajustado con el error estándar existente entre las dos muestras.

Módulo de elasticidad (kg/cm ²)		Módulo de elasticidad Correlacionado (kg/cm ²)		Error (%)	
Mínimo	35.37	Mínimo	0.93	Mínimo	0.57
1er Cuantil	65.00	1er Cuantil	91.06	1er Cuantil	8.75
Mediana	171.89	Mediana	144.15	Mediana	34.38
Media	157.90	Media	157.90	Media	43.42
3er Cuantil	193.76	3er Cuantil	213.46	3er Cuantil	62.87
Máximo	442.09	Máximo	374.26	Máximo	126.19

Resumen estadístico entre Número de golpes calculado y Número de golpes ajustado con el error estándar existente entre las dos muestras.

Número de Golpes		Número de Golpes Correlacionado		Error (%)	
Mínimo	9.00	Mínimo	9.86	Mínimo	0.15
1er Cuantil	20.50	1er Cuantil	20.31	1er Cuantil	3.82
Mediana	35.50	Mediana	31.63	Mediana	7.04
Media	33.88	Media	33.88	Media	7.74
3er Cuantil	50.00	3er Cuantil	47.13	3er Cuantil	11.36
Máximo	50.00	Máximo	55.44	Máximo	17.86

Resumen estadístico entre Velocidad de onda de corte calculado y Velocidad de onda de corte ajustado con el error estándar existente entre las dos muestras.

Velocidad de onda de Corte(m/s)		Velocidad de onda de Corte Correlacionado (m/s)		Error (%)	
Mínimo	224.0	Mínimo	210.6	Mínimo	0.96
1er Cuantil	226.7	1er Cuantil	236.8	1er Cuantil	2.99
Mediana	321.6	Mediana	332.7	Mediana	4.25
Media	305.4	Media	305.4	Media	4.54
3er Cuantil	353.6	3er Cuantil	374.6	3er Cuantil	5.69
Máximo	432.7	Máximo	401.6	Máximo	8.39